

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Rafael Pacheco dos Santos

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE NOVAS PEÇAS-
PADRÃO PARA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA
INDUSTRIAL**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Daniel
Donatelli

Co-orientador: Dr. Eng. Maurício de
Campos Porath

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

dos Santos, Rafael Pacheco

Desenvolvimento e Validação de novas peças-padrão para
tomografia computadorizada industrial [dissertação] /

Rafael Pacheco dos Santos ; orientador, Gustavo Daniel
Donatelli - Florianópolis, SC, 2012.

136 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Tomografia computadorizada
industrial por raios X. 3. Metrologia dimensional. 4.
Análise de sistemas de medição. I. Donatelli, Gustavo
Daniel. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Rafael Pacheco dos Santos

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE NOVAS PEÇAS-
PADRÃO PARA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA
INDUSTRIAL**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 11 de dezembro de 2012.

Prof. Júlio Cesar Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Maurício de Campos Porath, Dr.
Fundação Certi

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

A Deus acima de todas as coisas

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, professor Gustavo Daniel Donatelli e ao Dr. Maurício de Campos Porath pela paciência, conversas e pela oportunidade ofertada.

Aos meus queridos colegas de LABMETRO em especial Lidiani, João Paulo, James, Jerema, Cícero, Clarissa, Miguel, Mauro, Cintia, Helo, Ju, Deyse, Davi e Rosana. Nunca esquecerei vocês!

Aos antigos colegas de CIMJECT, minha primeira casa, em especial a Fernando Peixoto que me ensinou a amar o saber e ao professor Ahrens que me abriu a primeira porta.

Aos colegas da BraBo por ter entendido a minha situação e me apoiado em todos os momentos. Aos colegas de WZL que com sua atenção e sugestões ajudaram em muito nesse trabalho.

Aos meus pais a quem devo absolutamente tudo e que amo desesperadamente. Ao meu irmão, a pessoa mais parecida comigo na face da terra. A minha irmã, a mais bela flor do meu jardim. A minha sobrinha, uma brisa fresca no ardor da vida. Ao meu cunhado, bom homem a quem tenho o orgulho de ter conhecido.

Sobretudo a Deus.

O homem nada mais é que aquilo que
sabe.(Francis Bacon)

RESUMO

A tomografia computadorizada por raios X (TC) é uma emergente tecnologia de medição por coordenadas. Devido ao seu princípio físico que utiliza a atenuação de raios X, a TC permite um controle simultâneo das características geométricas e do material, sendo adequada para a medição de peças de alta complexidade geométrica, de baixa rigidez e de baixa densidade. Durante o processo de preparação de medição (setup) as decisões tomadas pelo usuário têm grande influência sobre a qualidade final da medição. Trata-se de uma etapa demorada e fortemente dependente da experiência do usuário, o que leva geralmente a soluções iterativas baseadas em prova e erro. A geração e sistematização do conhecimento sobre as relações entre a tarefa de medição, parâmetros de configuração e a matriz de voxel resultante pode ser considerado um importante passo para a consolidação da TC no âmbito da metrologia dimensional. Uma iniciativa nesse sentido é desenvolvida no escopo do programa BRAGECRIM. O projeto CT Metro prevê a melhoria do processo de setup através do desenvolvimento de um sistema que objetiva orientar o operador na escolha dos parâmetros de medição. Dentro desse escopo, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e validação experimental de um conjunto de peças que emulem aspectos específicos das tarefas de medição desempenhadas por tomógrafos industriais e que representem a sua grande diversidade. Tais peças foram desenvolvidas com uma abordagem sistemática levando em consideração aspectos específicos da tecnologia. Por fim, um conjunto de medições permitiu a validação das peças e um ganho significativo no entendimento sobre a relação entre parâmetros de configuração e qualidade do processo de medição.

Palavras-chave: tomografia computadorizada industrial por raios X, metrologia dimensional, análise de sistemas de medição.

ABSTRACT

The industrial computed tomography (CT) is an emerging technology of coordinate measuring. Due to its physical principle that uses the attenuation of X-ray, CT allows concurrent control of the geometric and material characteristics. It is suitable for measuring the geometric pieces of high complexity, low stiffness and low density. During the preparation process the definition of setup parameters are very important over measurement quality, however is slow and strongly dependent on the user experience which usually leads to iterative solutions. The generation and systematization of knowledge about the relationship among the measurement task, setup parameters and the resulting voxel matrix can be considered an important step towards the consolidation of CT in the context of dimensional metrology. One initiative in this way is developed within the scope of the project CTmetro. This project has the object to design software which will help the user on definition of setup parameters. Within this framework the present work had as objective the development and experimental validation of a set of pieces that emulate specific aspects of measurement tasks performed by industrial CT scanners and representing its great diversity. These pieces were developed with a systematic approach that used the best practices of precision engineering taking into account the specific aspects of technology. Taking care about the manufacturing process that enabled the calibration with low uncertainty values. Finally, the set of measurements allow the validation of parts as well as a significant gain in understanding the relationship between setup parameters and quality of the measurement process.

Keywords: industrial computed tomography x-ray, dimensional metrology, measurement systems analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais aplicações da tomografia computadorizada com aspectos metrológicos: a) comparação entre dados; b) análise dimensional e de tolerância geométrica; c) medição da espessura de parede.....	30
Figura 2 - a) processos para obtenção das imagens em 3D; b) fluxograma da medição por TC	31
Figura 3 – estrutura física de um tomógrafo industrial de fins metrológicos.....	32
Figura 4 - tela de trabalho dos softwares METROTOM OS® e CALYPSO®	33
Figura 5 – Mecanismo de geração de radiação X . No fenômeno da radiação branca, figura a, o elétron sofre diversas interações com os átomos do alvo. Já no fenômeno da radiação característica, figura b, o elétron transfere toda a sua energia em apenas uma interação.	34
Figura 6 - Espectro radiante e o efeito dos principais fatores de influência: a corrente da fonte geradora, figura “b”, e da tensão da fonte geradora, figura “c”.	35
Figura 7 – Mecanismos de atenuação da radiação X.: a) efeito fotoelétrico; b) dispersão de Compton; c) dispersão de Rayleigh.	36
Figura 8 - curva do coeficiente de atenuação do alumínio. Fica claro o efeito mais significativo dos fenômenos fotoelétricos e da dispersão de Compton.	37
Figura 9 – O efeito policromático do espectro de raios X associado a dependência do coeficiente de atenuação em relação a distribuição energética gera um artefato denominado endurecimento de feixes. Tal artefato pode ser melhor entendido através da figura que mostra esquematicamente uma esfera com presença, figura “a”, e ausência desse artefato, figura “b”.....	38
Figura 10 – Princípio físico de funcionamento do pré-filtro, figura “a”, e influência do material e espessura sobre o espectro radiante final, figura “b”....	38
Figura 11 – Efeito do posicionamento da peça sobre a ampliação da imagem e região de penumbra.....	40
Figura 12 – efeito do erro de posicionamento do eixo de ampliação sobre o desvio da medição.....	41
Figura 13 - representação esquemática do teorema das fatias de Fourier que é base para diversos métodos de reconstrução.....	42
Figura 14 - representação esquemática entre as relações do espaço do objeto, espaço de Fourier e o espaço de Radon.	42
Figura 15 – representação esquemática do processo de determinação de superfície que pode ser considerado como a definição do grau de cinza que ocorre a diferenciação entre peça e meio.	43
Figura 16 – diagrama espinha de peixe dos fatores que influenciam a qualidade e tempo de medição	45
Figura 17 - padrões com esferas de referência.....	48
Figura 18 - placa e cubo de calotas.	49
Figura 19 – <i>Stepcylinder</i>	49
Figura 20 - padrões com faces paralelas.	50
Figura 21 - padrões para múltiplos materiais.	51

Figura 22 - padrão para micro-TC.....	51
Figura 23 - peças reais utilizadas como padrões.....	52
Figura 24 – representação esquemática do funcionamento do sistema baseado em casos a ser desenvolvido para auxiliar o operador na definição dos parâmetros de configuração.....	53
Figura 26 – fluxograma de atividades para a elaboração do projeto final das peças.....	57
Figura 27 - função global que representa as correlações entre grandezas de entrada e saída do projeto.....	62
Figura 28 - estrutura de subfunções que representa mais detalhadamente as relações entre as grandezas de entrada e saída.....	62
Figura 29 – Soluções para o problema chave para posicionar e fixar. A figura “a” representa acoplamento quase cinemático e a “b” o acoplamento cinemático.....	65
Figura 30 – procedimento para a seleção das concepções mais viáveis.....	67
Figura 31 - concepções consideradas para matriz de decisão.....	68
Figura 32 - concepção alternativa “A”.....	69
Figura 33 - acoplamento concepção A.....	70
Figura 34 - concepção alternativa “B”.....	71
Figura 35 - conjunto de peças.....	74
Figura 36 - processo de cura.....	74
Figura 37 - localização dos mensurandos calibrados.....	76
Figura 38 - metodologia para validação.....	80
Figura 39 – peça real e padrão simples utilizado no experimento de intercomparação.....	82
Figura 40 - análise da profundidade de penetração em milímetros na peça real, padrão simples e padrões projetados.....	83
Figura 41 – peça sendo medidas no tomografo.....	86
Figura 42 - cartas de controle para o indicador de tendência do experimento relativo a análise do comportamento metrológico. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.....	88
Figura 43 - cartas de controle para o erro específico da tarefa de medição do experimento relativo a análise do comportamento metrológico. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.....	89
Figura 44 - cartas de controle para o indicador de tendência do experimento relativo a análise da profundidade de penetração. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.....	90
Figura 45 - cartas de controle para o erro específico da tarefa de medição do experimento relativo a análise da profundidade de penetração. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.....	90

Figura 46 - cartas de controle para o indicador de tendência do experimento relativo a análise do processo de detecção de superfície. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.92

Figura 47- desenho técnico do Anel 90 (Al).....101

Figura 48 - desenho técnico do Anel 90 (POM)102

Figura 49 - desenho técnico do Anel 60 (Al).....103

Figura 50 - desenho técnico do Anel 60 (POM)104

Figura 51 - desenho técnico do Anel 40 (Al).....105

Figura 52 - desenho técnico do Anel 40 (POM)106

Figura 53 - desenho técnico do base.....107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - categoria dos objetos para verificação da qualidade da imagem.	47
Tabela 2 - requisitos de projeto	60
Tabela 3 - Ponderação dos requisitos de projeto	61
Tabela 4 – estrutura matricial, denominada matriz morfológica, que sumariza todas as soluções encontradas.....	66
Tabela 5 - matriz de decisão para a definição da concepção mais adequada para o desenvolvimento.....	71
Tabela 6 - intervalo de amostragem do processo de calibração.....	76
Tabela 7 - resultado da calibração	77
Tabela 8 - parâmetros de configuração do experimento relativo à comparação entre peça projetada, peça real e padrão simples	84
Tabela 9 - parâmetros de configuração do experimento relativo à profundidade de penetração e processo de detecção de superfície	84
Tabela 10 - ordem das medições do experimento de intercomparação.....	Erro!
Indicador não definido.	
Tabela 11 - ordem das medições dos experimentos sobre profundidade de penetração e detecção de superfície.....	85
Tabela 12 - tabela de ponderação dos requisitos	100
Tabela 13- balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 90 (AI)	110
Tabela 14 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 90 (AI)	110
Tabela 15 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 90 (AI)	111
Tabela 16 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 90 (AI)	111
Tabela 17 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 90 (AI)	112
Tabela 18 - balanço de incerteza pista interna Anel 90 (AI).....	112
Tabela 19 - balanço de incerteza pista externa Anel 90 (AI)	113
Tabela 20 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 90 (POM).....	113
Tabela 21 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 90 (POM).....	114
Tabela 22 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 90 (POM).....	114
Tabela 23 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 90 (POM).....	115
Tabela 24 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 90 (POM)	115
Tabela 25 - balanço de incerteza pista interna Anel 90 (POM)	116
Tabela 26 - balanço de incerteza pista externa Anel 90 (POM).....	116
Tabela 27 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 60 (AI)	117
Tabela 28 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 60 (AI)	117
Tabela 29 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 60 (AI)	118
Tabela 30 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 60 (AI)	118
Tabela 31 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 60 (AI).....	119
Tabela 32 - balanço de incerteza pista interna Anel 60 (AI).....	119
Tabela 33 - balanço de incerteza pista externa Anel 60 (AI)	120
Tabela 34 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 60 (POM).....	120
Tabela 35 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 60 (POM).....	121
Tabela 36 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 60 (POM).....	121
Tabela 37 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 60 (POM).....	122

Tabela 38 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 60 (POM).....	122
Tabela 39 - balanço de incerteza pista interna Anel 60 (POM)	123
Tabela 40 - balanço de incerteza pista externa Anel 60 (POM).....	123
Tabela 41 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 40 (AI)	124
Tabela 42 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 40 (AI)	124
Tabela 43 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 40 (AI)	125
Tabela 44- balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 40 (AI)	125
Tabela 45 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 40 (AI)	126
Tabela 46 - balanço de incerteza pista interna Anel 40 (AI)	126
Tabela 47 - balanço de incerteza pista externa Anel 40 (AI)	127
Tabela 48 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 40 (POM).....	127
Tabela 49 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 40 (POM).....	128
Tabela 50 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 40 (POM).....	128
Tabela 51 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 40 (POM).....	129
Tabela 52 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 40 (POM).....	129
Tabela 53 - balanço de incerteza pista interna Anel 40 (POM)	130
Tabela 54 - balanço de incerteza pista externa Anel 40 (POM).....	130
Tabela 55 - compilação dos resultados da calibração	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TC – Tomografia computadorizada

BRAGECRIM – Iniciativa de pesquisa colaborativa germano-brasileira sobre tecnologia de fabricação

CsI – Iodeto de cézio

Gd₂O₂S – Oxisulfeto de gadolínio

GUM – Guia para expressão da incerteza de medição

MMC – Máquina de medição por coordenadas

ISO - Organização Internacional de Normatização

MPE – Erro máximo admissível

LABMETRO - Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

WZL - Laboratório de Máquinas Ferramenta da Universidade Técnica de Aachen

RWTH – Universidade Técnica de Aachen

CERTI - Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras

I.D.R.– Índice diferenciador de requisito

I.D.– Índice diferenciador

MMQ – Método de mínimos quadrados

Srms– Dispersão do erro específico da tarefa de medição

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC).....	29
2.1. CONCEITOS BÁSICOS.....	29
2.2. ESTRUTURA DE UM TOMÓGRAFO INDUSTRIAL	31
2.3. PROCESSOS FÍSICOS.....	33
2.3.1. Processo de geração da radiação X	33
2.3.2. Interação entre raios X e a peça.....	35
2.3.3. Processo de obtenção das projeções	39
2.3.4. Processo de posicionamento da peça	40
2.3.5. Processo de reconstrução e detecção de superfície.	41
2.4. ASPECTOS METROLOGICOS	44
2.5. PEÇAS PADRÃO.....	46
2.6. PROGRAMA BRAGECRIM E PROJETO CTMETRO	52
3. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES PREVISTAS.....	55
4. DESENVOLVIMENTO, PROTOTIPAGEM E CALIBRAÇÃO	57
4.1. METODOLOGIA DE PROJETO	57
4.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO	59
4.2.1. DEFINIÇÃO E PONDERAÇÃO DOS REQUISITOS DE PROJETO	59
4.3. GERAÇÃO DE PRINCÍPIOS DE SOLUÇÕES	63
4.3.1. GEOMETRIA DE MEDIÇÃO	63
4.3.2. SOLUÇÃO PARA MUDAR MATERIAL, TAMANHO E PENETRAÇÃO	64
4.3.3. SOLUÇÃO PARA POSICIONAR E FIXAR	65
4.4. GERAÇÃO DAS COMBINAÇÕES.....	66
4.5. SELEÇÃO DA MELHOR COMBINAÇÃO.....	67
4.6. DETALHAMENTO DA SOLUÇÃO	72
4.7. PROTOTIPAGEM	73
4.8. CALIBRAÇÃO	75

5. VALIDAÇÃO	79
5.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	81
5.1.1. DEFINIÇÃO DAS PEÇAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS	81
5.1.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DOSEXPERIMENTOS E DAS VARIÁVEIS DE ANALISADAS	84
5.2. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	86
5.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
6. CONCLUSÃO	93
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	95

1.INTRODUÇÃO

A tomografia computadorizada (TC) é um método radiológico que proporciona uma excelente alternativa quando o objetivo é localizar e medir detalhes em volumes tridimensionais[1].Ela permite uma caracterização física do material, podendo ser utilizada em materiais metálicos, não metálicos, fibrosos e em superfícies rugosas e irregulares.[1][2]

Devido a essas vantagens os campos de aplicação são diversos com destaque para três deles:

- obtenção de imagens médicas (historicamente a primeira aplicação);[1][2]
- ensaio não destrutivo;[1][2]
- análise dimensional de peças de alta complexidade fabricadas principalmente em polímeros de engenharia e alumínio.[1][2]

Apesar desses campos de aplicação utilizarem os mesmos princípios físicos e matemáticos, os aparelhos e procedimentos diferem profundamente. Enquanto os tomógrafos médicos exigem baixas doses de radiação e que o aparelho gire ao redor do paciente, os tomógrafos industriais apresentam exigências como alta capacidade de penetração, resolução espacial, exatidão da medição e rastreabilidade. [2]

Todas as exigências tornam o uso da tomografia computadorizada em aplicações metrológicas algo não trivial e que requer substanciais desenvolvimentos para trazer a tecnologia à maturidade.[2]

Dentro desse contexto, especial atenção tem sido dada à necessidade de se obter maior exatidão na medição geométrica, que exigiu uma investigação minuciosa dos parâmetros que influenciam a incerteza da medição[2]. Um deles é o processo de determinação dos parâmetros de configuração, uma responsabilidade do operador[2].

Durante esse processo as decisões tomadas pelo usuário (orientação da peça, valores de corrente e tensão, espessura de pré-filtros e número de projeções, entre outras) têm grande influência sobre a qualidade final da medição[3]. Essa determinação, contudo, é demorada e fortemente dependente da experiência do usuário levando geralmente a soluções iterativas, baseadas em prova e erro[4][5].

A geração e sistematização do conhecimento sobre as relações entre a tarefa de medição, parâmetros de configuração e a matriz de voxel

resultante pode ser considerado um importante passo para na consolidação da TC no âmbito da metrologia dimensional.[4][5]

Uma iniciativa nesse sentido é desenvolvida dentro do escopo do programa BRAGECRIM (*Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology*). O projeto CTmetro prevê a melhoria do processo de configuração através do desenvolvimento de um sistema que permita orientar o operador na escolha dos parâmetros de medição, visando reduzir o tempo e as incertezas do processo de medição.[4][5]

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um conjunto de peças parametrizadas para a realização de experimentos sobre a influência de diversas tarefas de medições e parâmetros de configuração na qualidade da matriz de voxel resultante. Os resultados desses experimentos constituirão as bases para o sistema de orientação ao operador mencionado anteriormente.

O documento foi estruturado de tal maneira que no capítulo 1 foram apresentados alguns conceitos gerais sobre a tecnologia da mesma forma que foi contextualizado o tema proposto e, por fim, apresentado de forma resumida os objetivos do trabalho.

Já o capítulo 2 aprofunda-se nos conceitos mais relevantes da tecnologia. Ele contém uma breve descrição do processo de funcionamento juntamente com os principais módulos do equipamento. Informações sobre os aspectos metrológicos envolvidos na medição e um levantamento detalhado dos principais padrões utilizados atualmente, além de informações gerais sobre o projeto CTmetro também podem ser encontrados nesse capítulo.

O capítulo 3 apresenta os objetivos do trabalho e o capítulo 4 detalha o processo de desenvolvimento do conceito final. Especial atenção foi dada à sistematização do processo de desenvolvimento que culminou na apresentação do projeto final das peças. A determinação e execução dos processos de prototipagem e calibração também são focos desse capítulo.

O processo de validação com a determinação do conjunto de peças mais similares, o planejamento experimental, a execução dos experimentos e a análise dos resultados podem ser encontrado no capítulo 5. Por fim, a conclusão está no capítulo 6. Além disso, há três Apêndices que contém informações sobre a matriz de ponderação, os desenhos técnicos elaborados e o cálculo das incertezas de medição.

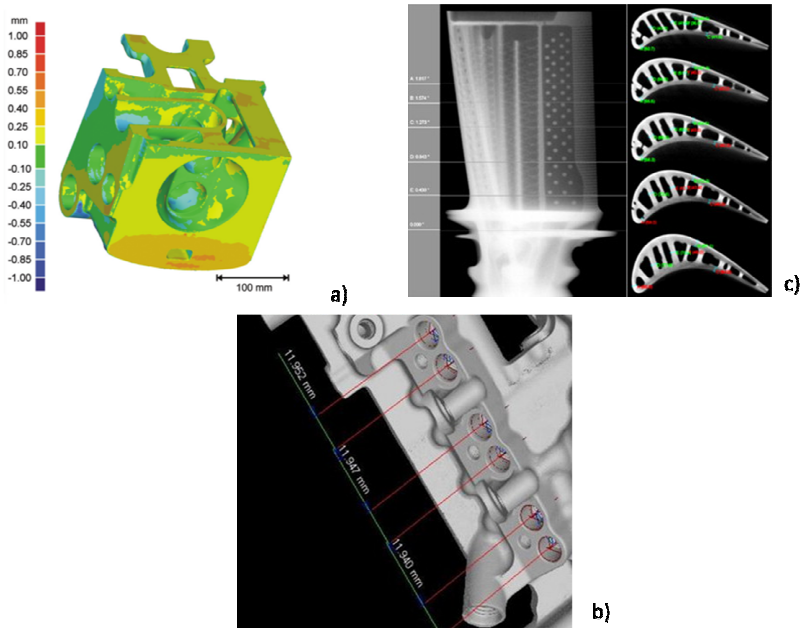
2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC)

2.1. CONCEITOS BÁSICOS

Os primeiros tomógrafos para análise dimensional surgiram por volta de 1990, mas ainda bastante rudimentares ao ponto de não poderem ser considerados uma opção para outros métodos metrológicos mais desenvolvidos[4][6]. Foi somente a partir de 2005, com o desenvolvimento de aparelhos dedicados, que a tomografia realmente tornou-se uma opção válida para os sistemas de medição tridimensionais tradicionais[4][6]. Atualmente, a TC é considerada uma tecnologia viável para aplicações metrológicas estando incorporada a alguns dos principais laboratórios do mundo e compondo a sala de inspeção de diversas indústrias. [2]

As principais aplicações desses equipamentos são a obtenção de mapas de desvio com a comparação entre os dados obtidos com dados nominais, a medição da espessura de parede em peças injetadas ou fundidas e a análise dimensional e de tolerância geométrica [2][4][6]. A Figura 1 ilustra justamente essas tarefas. A imagem “a” demonstra a comparação entre dados obtidos e dados nominais, sendo as cores indicativas da magnitude do desvio. A imagem “b” exemplifica a análise dimensional de furos de um bloco de motor e, por fim, a imagem “c” mostra a medição da espessura de parede em diversas seções de uma pá de turbina.

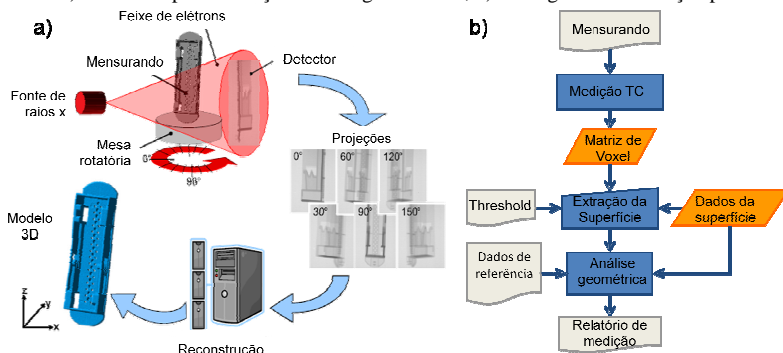
Figura 1 - Principais aplicações da tomografia computadorizada com aspectos metrológicos: a) comparação entre dados; b) análise dimensional e de tolerância geométrica; c) medição da espessura de parede



Fonte: adaptado [2]

Já a Figura 2 mostra esquematicamente como acontece o processo de medição (imagem 2.a) além de um fluxograma com as principais etapas de medição com TC (imagem 2.b). Apesar de cada tarefa de medição específica apresentar particularidades, o processo de obtenção do modelo 3D é sempre igual [2]. Mais detalhes sobre cada etapa pode ser encontrado nas seções seguintes.

Figura 2 - a) Processos para obtenção das imagens em 3D; b) Fluxograma da medição por TC



Fonte: adaptado [7]

2.2. ESTRUTURA DE UM TOMÓGRAFO INDUSTRIAL

Diferentemente do que ocorre com os tomógrafos para aplicações médicas¹, nos tomógrafos para aplicações industriais a máquina permanece fixa enquanto a peça gira [2]. As principais partes do sistema são:

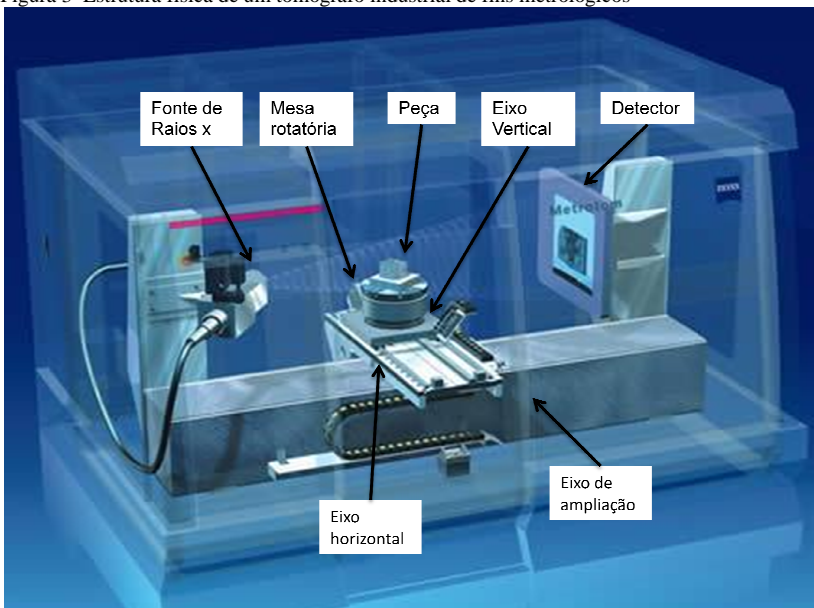
- A fonte geradora de radiação que é a responsável pela formação e características do espectro da radiação X. Tais características somente podem ser modificadas pela existência de uma placa de cobre ou alumínio (denominada pré-filtro) posicionada na saída da fonte.[2]
- O detector é o dispositivo responsável pela captação da radiação que ultrapassa a peça.[2]
- A mesa rotativa é responsável pelo posicionamento da peça nos diversos ângulos necessários para cada projeção.[2]
- Um eixo horizontal perpendicular ao eixo de ampliação é responsável pelo posicionamento da peça fora do volume de medição.[2]
- Um eixo vertical para o posicionamento na altura adequada para a medição em tomógrafos com

¹ Na TC para aplicações médicas o tomógrafo gira ao redor do paciente.

detectores planos e para a movimentação da mesa rotativa e peça nos tomógrafos com detectores lineares.[2]

- Um eixo horizontal, conhecido como eixo de ampliação, para o posicionamento da peça entre a fonte e o detector. A razão entre a distância da fonte ao detector com a distância da fonte ao objeto é denominada ampliação e tem forte influência sobre o resultado da medição [2]. A Figura 3 mostra esses componentes.

Figura 3—Estrutura física de um tomógrafo industrial de fins metrológicos



Fonte: adaptado [8]

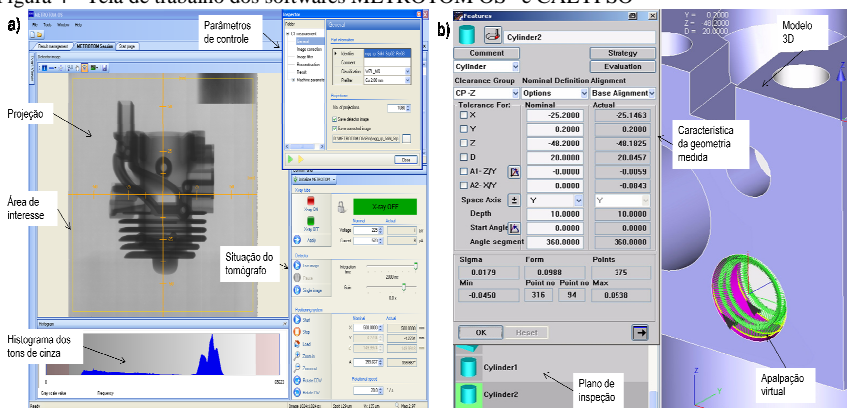
Além disso, as principais tarefas de medição realizadas por esses equipamentos exigem a existência de uma estação de controle e armazenamento dos dados obtidos.

Tais dados, além de serem na ordem de gigabites e dificultarem a manipulação computacional, também exigem softwares especializados que constituem parte essencial do processo de medição.

Tais softwares são programas específicos para tomografia industrial ou programas para análise dimensional. Os primeiros têm como principal função o processo de reconstrução e determinação da superfície enquanto os segundos são usados para tarefas específicas de metrologia dimensional como extração de características geométricas (planos, cilindros, cones etc.), análise de tolerância, entre outras.

A Figura 4 mostra as telas de trabalho de dois softwares. A imagem “a” refere-se ao programa de controle do METROTOM OS® e a imagem “b” ao programa de análise dimensional CALYPSO®, ambos da empresa Zeiss.

Figura 4 - Tela de trabalho dos softwares METROTOM OS® e CALYPSO®



2.3. PROCESSOS FÍSICOS

2.3.1. Processo de geração da radiação X

Como mostrado na Figura 2.a, tudo se inicia na fonte de radiação. Nela ocorre o choque de feixes de elétrons gerados por termoemissão no filamento do cátodo contra a superfície de uma região do anodo denominada de alvo. Esse choque provoca a redução da energia cinética desses elétrons, a elevação da temperatura e a emissão de raios X.[2][9]

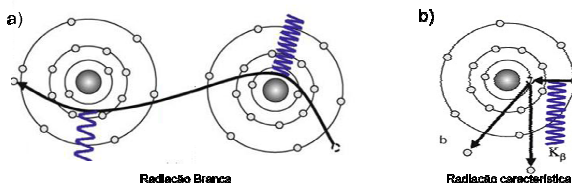
Durante a interação entre elétrons e anodo ocorrem quatro processos que provocam a difração e a desaceleração dos feixes de elétrons. Entretanto, apenas dois tem como produto a geração de raios

X: o fenômeno da emissão característica e o fenômeno da radiação branca (em alemão *bremstrahlung*).[1][2]

A Figura 5 mostra esquematicamente esses dois fenômenos. No *bremstrahlung* ocorre a múltipla emissão de fótons devido a diversas interações de cada elétron emitido com os átomos do alvo. Isso gera uma distribuição contínua por um largo espectro energético.[2][9]

Já na emissão de radiação característica, toda energia do elétron é transferida de uma só vez produzindo picos energéticos que são particulares para cada número atômico (por isso radiação característica).[2][9]

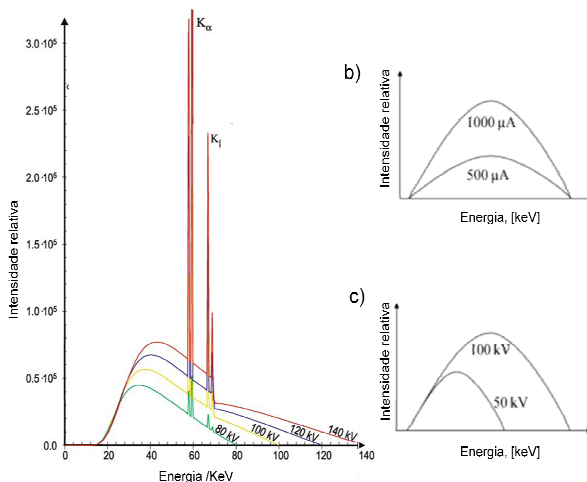
Figura 5–Mecanismo de geração de radiação X . No fenômeno da radiação branca, figura a, o elétron sofre diversas interações com os átomos do alvo. Já no fenômeno da radiação característica, figura b, o elétron transfere toda a sua energia em apenas uma interação.



Fonte: adaptado [9]

O espectro de radiação resultante, como mostrado na Figura 6, é caracterizado pela distribuição energética e pela intensidade, sendo fortemente influenciados pela tensão e corrente da fonte[9][2]. A tensão influencia ambos, distribuição e intensidade, enquanto a corrente afeta apenas a intensidade[2].

Figura 6 - Espectro radiante e o efeito dos principais fatores de influência: a corrente da fonte geradora, figura “b”, e da tensão da fonte geradora, figura “c”.



Fonte: adaptado [2] e [9]

2.3.2. Interação entre raios X e a peça.

Os feixes gerados atravessam, então, a peça e sofrem uma redução na intensidade devido aos fenômenos de absorção fotoelétrica, dispersão de Compton² e, com menor efeito, dispersão de Rayleigh. [1][4][9]

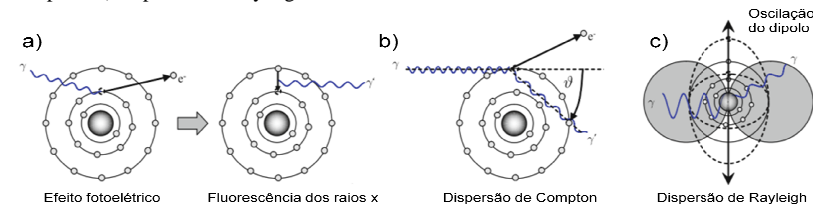
O efeito fotoelétrico (efeito de foto-absorção) ocorre quando um fóton é absorvido por um elétron de uma camada interna do átomo. Se a energia do fóton for superior à energia de ligação do elétron, esse é ejetado com energia igual à diferença entre a energia do fóton e a sua energia de ligação e seu lugar é ocupado por outro elétron proveniente de camadas mais externas. O resultado é a emissão de uma fluorescência de raios X característica e um elétron denominado fotoelétrico. [1][4][9]

A dispersão de Compton ocorre de maneira diferente. Na prática, é uma mistura entre o processo de foto-absorção e dispersão. Nela o feixe de fótons colide contra um elétron de valência provocando a mudança de direção e redução da energia do feixe e a ejeção do elétron (elétron de Compton). O ângulo de dispersão do feixe é um importante parâmetro para o cálculo da energia transferida ao elétron de Compton. [1][4][9]

² Esses fenômenos são os predominantes para a faixa típica de TC industrial que é de 20 a 450 kV.

Já o fenômeno da dispersão de Rayleigh, também denominado dispersão de Thomson, ocorre quando o núcleo de dispersão é pequeno comparado com o comprimento de onda do feixe incidente. Nesse caso, há a vibração momentânea do elétron e não há ionização e excitação do átomo. Os feixes incidentes e emergentes possuem direções diferentes comprimentos de onda, mas valores energéticos iguais, ou seja, não há transferência de energia para o elétron[1][9]. Os três fenômenos são mostrados esquematicamente na Figura 7.

Figura 7–Mecanismos de atenuação da radiação X.: a) efeito fotoelétrico; b) dispersão de Compton; c) dispersão de Rayleigh.



Fonte: adaptado [9]

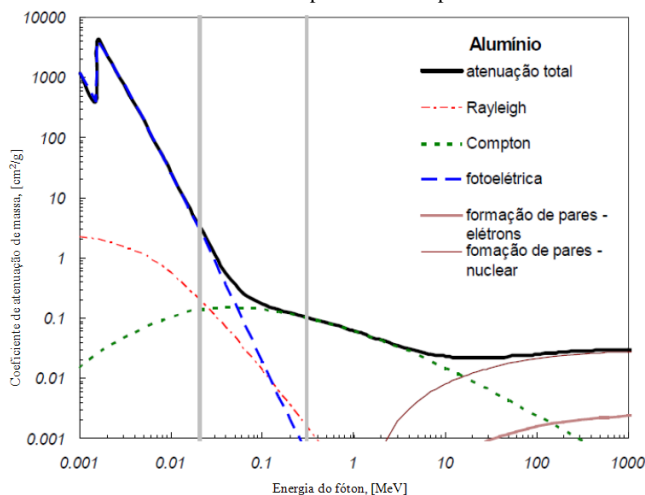
Esses três fenômenos combinam-se provocando a redução da intensidade do feixe ao penetrar no material. Esse comportamento pode ser descrito pela equação 1, denominada equação de Lambert-Beer.[2]

Equação 1

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Na qual $I(x)$ é a intensidade da radiação na profundidade de penetração x , $I(0)$ é a intensidade de radiação inicial e μ é o coeficiente de atenuação. O coeficiente de atenuação pode ser influenciado pela densidade e composição do material e também pela distribuição energética dos raios X[1][4][9]. A Figura 8 mostra como os diversos fenômenos contribuem para a determinação do valor de coeficiente de atenuação do Alumínio. As colunas em cinza delimitam o espectro energético típico dos tomógrafos utilizados para metrologia dimensional. Fica claro que para esse espectro energético os fenômenos que mais contribuem são o efeito fotoelétrico, a dispersão de Compton e, em menor escala, a dispersão de Rayleigh.

Figura 8 - Curva do coeficiente de atenuação do alumínio. Fica claro o efeito mais significativo dos fenômenos fotoelétricos e da dispersão de Compton.



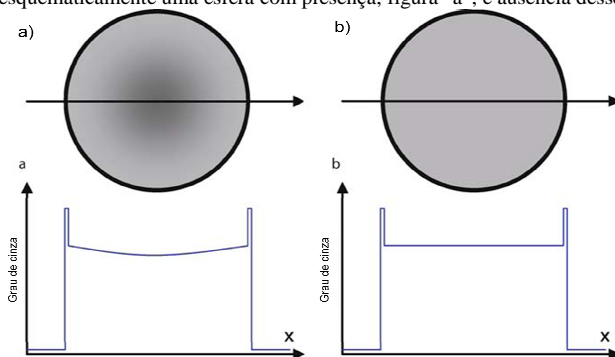
Fonte: adaptado [4]

Um importante fato demonstrado da Figura 8 é a dependência do coeficiente de atenuação em relação à distribuição energética que, associada à natureza policromática do espectro, é responsável pela geração de um artefato³ denominado endurecimento de feixe (em inglês *beamhardening*). [9]

O *beamhardening* caracteriza-se pela atenuação mais rápida dos fótons com valores energéticos mais baixos. Isso faz com que os primeiros milímetros da peça pareçam ser mais absorventes do que o interior [4][9]. O efeito é claramente observado nas imagens obtidas por TC, como esquematicamente mostrada na Figura 9, no qual o interior da peça aparece mais escuro do que as bordas, o que não corresponde à realidade.

³ Artefato em TC refere-se a uma discrepância entre o real valor da propriedade física da peça e o valor obtido por tomografia.

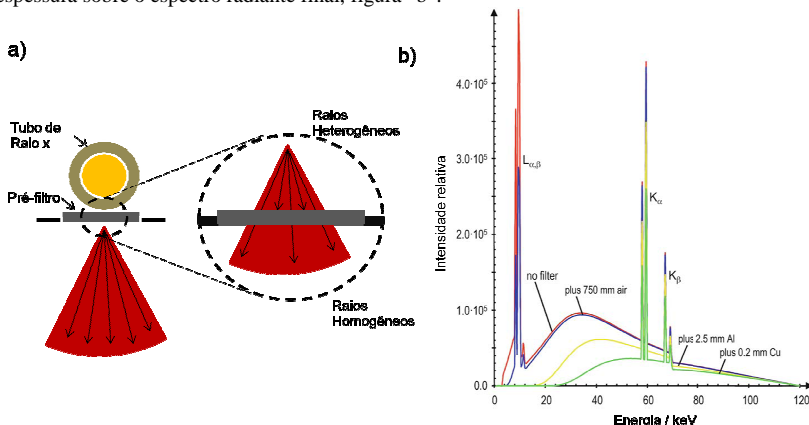
Figura 9—O efeito policromático do espectro de raios X associado a dependência do coeficiente de atenuação em relação a distribuição energética gera um artefato denominado endurecimento de feixes. Tal artefato pode ser melhor entendido através da figura que mostra esquematicamente uma esfera com presença, figura “a”, e ausência desse artefato, figura “b”.



Fonte: adaptado [9]

Uma das maneiras de reduzir esse artefato é a colocação de uma fina placa, geralmente de Cobre ou Alumínio, entre a fonte e a peça[2]. Tal filtro físico (cujas espessura e material é um parâmetro a ser definido pelo operador durante o processo de configuração) permite a atenuação dos fótons menos energéticos antes de penetrarem na peça, ou seja, ela torna o espectro radiante mais homogêneo, como esquematicamente mostrado na Figura 10. A determinação correta do material e espessura do filtro, associado à tensão e a corrente da fonte é de grande dificuldade e influência sobre o resultado da medição.

Figura 10—Princípio físico de funcionamento do pré-filtro, figura “a”, e influência do material e espessura sobre o espectro radiante final, figura “b”.



Fonte: adaptado [9]

2.3.3. Processo de obtenção das projeções

Tão importante quanto à geração de um espectro radiante com características adequadas é o processo de obtenção das projeções. Nesse processo o componente mais importante é o detector que é dividido em duas categorias: gasosos e sólidos. Eles utilizam os produtos da interação entre a radiação X e o material como estímulo físico para a medição.[9]

Os detectores gasosos foram os primeiros desenvolvidos no século XIX e ainda são encontrados em alguns tomógrafos da terceira geração. Contudo, esse tipo de tecnologia vem perdendo espaço e atualmente quase todos os tomógrafos utilizam detectores sólidos. [9]

Os detectores sólidos, fabricados com terras raras como o iodeto de cério (CsI) ou oxissulfeto de gadolínio (Gd_2O_2S), interagem com os feixes de fótons e produzem luz que sensibiliza uma matriz de fotodiodos localizada logo abaixo. Esses fotodiodos funcionam como capacitores, integralizando e armazenando carga elétrica durante toda a exposição. [9]

Esse sinal, por sua vez, é transmitido por um transistor de película fina para um sistema de aquisição de sinal que amplifica e converte o sinal analógico em digital. Esse processo ocorre dentro de um único chip. Por isso, é um processo de alta qualidade e baixo ruído. [4]

Os detectores sólidos podem ser encontrados dispostos em linha, em plano, na forma cilíndrica ou como elementos isolados. Para tomógrafos industriais os detectores são normalmente planos com área variando entre $(100 \times 100) \text{ mm}^2$ a $(410 \times 410) \text{ mm}^2$, integrando até 2048×2048 elementos. O tamanho de cada elemento varia entre 200 e 400 μm . [4][2]

Já a eficiência pode ser quantificada através do coeficiente de eficiência geométrica e o coeficiente de eficiência energética. O primeiro relaciona a área iluminada com a área total do detector. O segundo relaciona a energia transformada em sinal com a energia total do feixe de fótons. [9]

A qualidade da detecção pode ser afetada também pelo tempo necessário para que o cintilador se recupere da emissão anterior, ou seja, o tempo necessário para que o elétron excitado volte ao seu estado normal e deixe de emitir luz.[4]

A histerese do detector, ou seja, os danos causados ao ganho do cintilador devido à exposição à radiação é outro fator de influência importante. Estes danos variam de acordo com a história de uso do

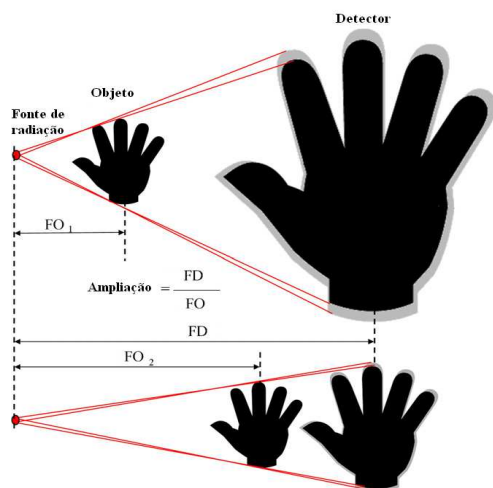
detector. O ganho é também influenciado pela estabilidade térmica do cintilador.[4]

2.3.4. Processo de posicionamento da peça

Além dos cuidados necessários com o espectro de radiação, calibração do detector entre outros, o correto e preciso posicionamento da peça entre a fonte e o detector tem grande importância sobre a qualidade do processo de medição.

Contudo, tal definição não é uma tarefa trivial. A escolha de pequenos valores, ou seja, do posicionamento da peça mais próximo da fonte e grande ampliação tem um efeito positivo e outro negativo.[2][10] Ele possibilita um alto valor de resolução espacial⁴ mas em contrapartida aumenta a região de penumbra que existe devido ao tamanho finito do ponto focal. A Figura 11 mostra esquematicamente esse fato.

Figura 11–Efeito do posicionamento da peça sobre a ampliação da imagem e região de penumbra.



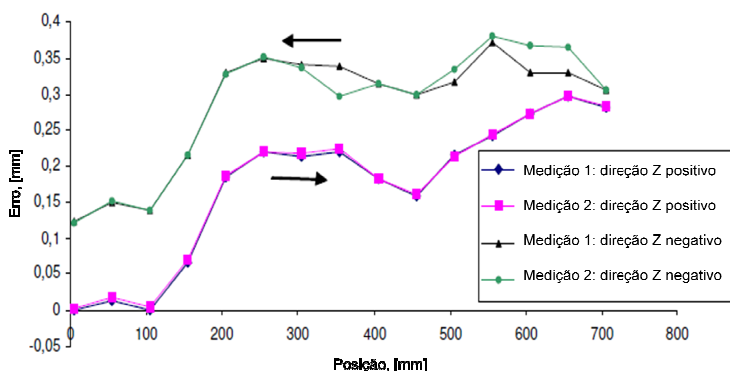
Fonte: adaptado [2]

⁴ Resolução espacial é definida como a menor dimensão que pode ser percebida pelo detector

Da mesma forma, quaisquer erros nos eixos mecânicos têm grande influência sobre o resultado da medição[11]. A Figura 12 traz o resultado de um estudo realizado na Universidade Católica de Leuven, na Bélgica, e mostra que o desvio pode atingir valores de 0,35 mm.[2][12]

Os resultados também mostram que há diferença na repetitividade das medições para valores de Z crescentes e valores de Z decrescente o que caracteriza um efeito de histerese.

Figura 12—Efeito do erro de posicionamento do eixo de ampliação sobre o desvio da medição



Fonte: adaptado [2]

2.3.5. Processo de reconstrução e detecção de superfície.

Todas as projeções, por sua vez, são utilizadas no processo de reconstrução que consiste na obtenção da melhor estimativa da secção transversal do objeto. Já em termos matemáticos, o processo de reconstrução pode ser descrito como a obtenção da função original a partir das suas projeções e foi resolvido pelo matemático austríaco Johann Radon, em 1917.[8][12]

Ele demonstrou que se as projeções de todos os ângulos de uma imagem bidimensional tiver intensidade conhecida, a função original, $f(x,y)$, poderá ser reconstruída a partir das suas projeções, $p_r(\xi)$. [8][12]

Há métodos analíticos e iterativos para realizar a reconstrução tomográfica. Os métodos analíticos baseiam-se no teorema das fatias de Fourier, enquanto que os métodos iterativos procuram soluções numéricas para resolver as equações das projeções. [8][12]

O teorema das fatias de Fourier garante que a intersecção entre o espaço de Fourier, $F(u,v)$, e o espaço da função original, $f(x,y)$, para

um determinado ângulo é igual à transformada de Fourier da função $p_\gamma(\xi)$ [8][12]. A Figura 13 mostra esquematicamente o conceito.

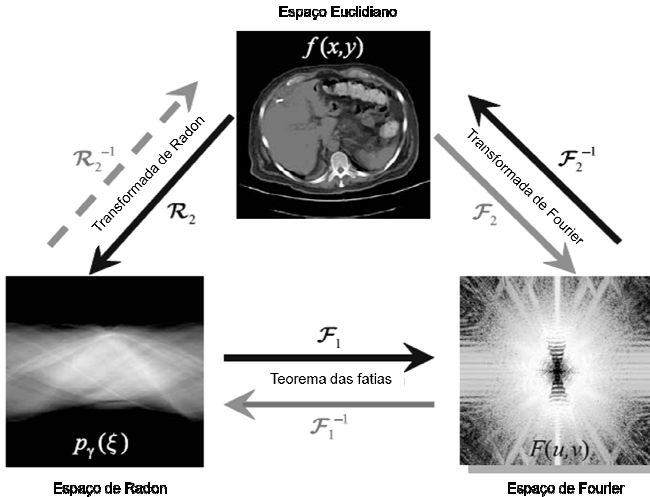
Figura 13 - Representação esquemática do teorema das fatias de Fourier que é base para diversos métodos de reconstrução.

$$\begin{array}{ccc}
 F(u,v) & = & P_\gamma(q) \\
 \uparrow & & \downarrow \\
 (u,v) & \xleftrightarrow[\substack{u = q \cos(\gamma) \\ v = q \sin(\gamma)}]{(q,\gamma)} & (q,\gamma)
 \end{array}$$

Fonte: adaptado [9]

Essa é a mais importante conclusão de todos os métodos analíticos e pode ser sumarizada em uma linha: A transformada unidimensional de Fourier do perfil projetado é identificada como uma linha radial do espaço de Fourier para um determinado ângulo. Todas essas relações permitem a obtenção da transformada inversa de Radon como mostra a figura 14.a. [9]

Figura 14 - Representação esquemática entre as relações do espaço do objeto, espaço de Fourier e o espaço de Radon.



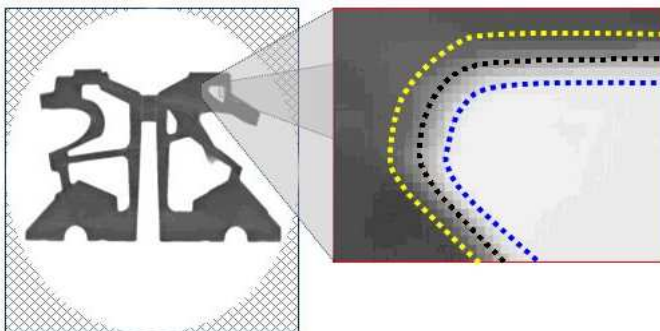
Fonte: adaptado [9]

Entre todos os métodos, a retroprojeção filtrada é o método de reconstrução mais utilizado atualmente. A qualidade das imagens geradas é superior a dos outros métodos e o tempo de processamento é menor. Esse desempenho resulta do adequado tratamento matemático dado à mudança do sistema de coordenadas de polar para o cartesiano.[8][12]

Entretanto, desvantagens existem e uma delas é o tratamento igualitário a todos os raios X, o que acaba maximizando alguns tipos de artefatos. Os métodos algébricos e estatísticos trabalham com diferenciação da importância dos raios e aparecem com uma alternativa. Porém, a demanda computacional desses métodos é muito grande o que dificulta o processo de reconstrução. [9]

Após a reconstrução, um dos processos mais importantes é o processo de detecção de superfície (em inglês *threshold*). Ele pode ser definido como o processo de escolha do nível de cinza no qual haverá a diferenciação entre a peça e o meio. A Figura 15 demonstra esse conceito.[4][12][13]

Figura 15—Representação esquemática do processo de determinação de superfície que pode ser considerado como a definição do grau de cinza que ocorre a diferenciação entre peça e meio.



Fonte: adaptado [12]

Uma das maneiras mais comuns de realizar essa tarefa é a utilização do método ISO 50% que assume a transição no valor médio entre os graus de cinza da peça e do meio. Contudo, testes realizados na Universidade Católica de Leuven mostraram que o ISO 50% provoca distorções em alguns tipos de materiais. Os padrões fabricados em alumínio apresentaram-se menores enquanto os padrões de aço mostraram-se maiores.[2]

Essas discrepâncias devem-se aos valores otimizados para o processo de detecção de superfície. No caso do alumínio fica entre (35-45)%; enquanto para o aço, entre (80-90)%. [2]

Por isso, uma alternativa é a utilização de um método que determina a superfície no ponto de máximo gradiente entre os tons de cinza. [4]

2.4. ASPECTOS METROLOGICOS

Durante o processo de medição, uma grande quantidade de fatores, conforme mostrado na Figura 16, influencia as características metrológicas do sistema de medição. Consequentemente, os tomógrafos industriais apresentam diversas distorções aleatórias ou sistemáticas em relação às reais características medidas [14]. Tais distorções podem ser classificadas em quatro grupos:

- Erros de escala: estão geralmente associados a erros no fator de escala e tem característica sistemática;
- Erros devido ao processo de detecção de superfície: estão geralmente associados a valores incorretos de *threshold* tem característica sistemática;
- Erros aleatórios: estão associados a uma variedade de fenômenos que muitas vezes se relacionam e não são passíveis de correção;
- Erros devido à limitada frequência de resposta: estão associados ao tamanho finito do ponto focal.

Figura 16—Diagrama espinha de peixe dos fatores que influenciam a qualidade e tempo de medição



O impacto de cada tipo de erro na qualidade do processo de medição é fortemente dependente da tarefa de medição e dos parâmetros de configuração definidos pelo operador. [3][14][15]

Também devido à grande quantidade de fatores que influencia a medição e as múltiplas aplicações da TC, a determinação dos procedimentos que garantam a correta avaliação da incerteza e consequente rastreabilidade está em fase de elaboração. [4][6][10]

Especial atenção tem sido dada a correta definição da incerteza de medição. Ela é a propriedade que melhor caracteriza a qualidade do resultado obtido e é essencial para a garantia da rastreabilidade da medição.[2]

Até agora, apesar dos esforços de diversos centros de pesquisas, empresas e universidades, não foram elaboradas normas que definam a correta avaliação da incerteza em TC. Algumas abordagens, contudo, se mostram bastante promissoras e são atualmente as mais pesquisadas.[6]

A primeira se baseia no guia de expressão de incerteza (GUM) para a avaliação do resultado. Apesar de ser o documento mais utilizado na definição de incerteza de medição, a dificuldade na identificação e quantificação dos efeitos dos fatores de influência sobre o resultado de medição, exigência do método proposto no GUM, têm trazido insucessos para essa abordagem. [2][4]

A determinação da incerteza de medição por simulação numérica, procedimento já utilizada em outros tipos de MMC e descrito

no suplemento 1 do GUM, é uma possibilidade. Contudo, o mesmo problema relacionado com a identificação e quantificação dos efeitos sobre a incerteza de medição é presente. Outra opção é a utilização de métodos experimentais como os descritos nas normas ISO/TS 15530-2 e ISO/TS 15530-3. [2]

A ISO/TS 15530-2 descreve o procedimento para estimar a incerteza da medição a partir de várias medições tomadas em diferentes orientações e localizações do volume de medição. Como localização e orientação têm forte influência sobre o resultado da medição, a medição em localização e orientação aleatória não representa o procedimento adotado por um operador de TC experiente. [2]

Já a abordagem inspirada na ISO/TS 15530-3 é a mais aceita atualmente. O procedimento é baseado na repetição da medição de corpos de referência calibrados sob mesma condição, operador e estratégia de medição. Ele leva em consideração a repetitividade (u_{rep}), a incerteza associada ao valor calibrado do corpo de referência (u_{cal}), a incerteza associada à variabilidade da peça ($u_{peça}$), os efeitos sistemáticos não corrigidos (b) e o coeficiente de expansão no cálculo da incerteza expandida (U). A equação 2 mostra esse modelo. [2][6][16][15]

Equação 2

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_{rep}^2 + u_{peça}^2 + b^2}$$

Um aspecto crítico da utilização da equação 2 é que ela não leva em conta aspectos específicos da peça que não podem estar presentes no corpo de referência como rugosidade e estabilidade térmica. Diversos trabalhos, contudo, mostraram que é possível transferir a incerteza de medição obtida por corpos de referência para peças retiradas da produção semelhante. [2]

2.5. PEÇAS PADRÃO

Juntamente com as exigências de alta resolução e profundidade de penetração, a tomografia computadorizada necessita garantir a qualidade do processo de medição. Para isso, uma das opções mais comuns e que vem ao encontro da ISO/TS 15530-3 é a utilização de corpos de referência especialmente elaborados, denominados peças padrão, ou simplesmente peças calibradas. [2][6][17]

A norma ISO 15708-2, que tem como objetivo orientar sobre a confiabilidade das imagens obtidas por métodos radiológicos traz no seu

escopo uma Tabela 1 que relaciona o objeto com a característica que se deseja identificar. [1][4]

Tabela 1 - Categoria dos objetos para verificação da qualidade da imagem.

Objetivo da peça de teste	Características da peça
Resolução	Furos Quadrados Linhas ou matrizes Bordas
Contraste	Sinal/ruído em material uniforme Variação de pequenas densidades Vários sólidos Líquidos com diferentes tipos de agente de contraste
Espessura de parede	Pirâmides Cones Padrões escalonados com esferas Planos inclinados Fendas em espiral
Exatidão geométrica	Cilindros ocos Matrizes de furos calibrados Objetos de testes que simulam peças reais
Artefatos	Objetos de teste com densidade homogênea

Fonte: adaptado [1]

Destaca-se atualmente a grande necessidade do desenvolvimento de corpos de referência bem elaborados com o intuito de investigar os fatores que influenciam a exatidão da medição e que possibilitam a intercomparação e calibração desses sistemas. Isto contrasta com a situação das máquinas de medição tradicionais que apresentam procedimentos e padrões bem estabelecidos.[2]

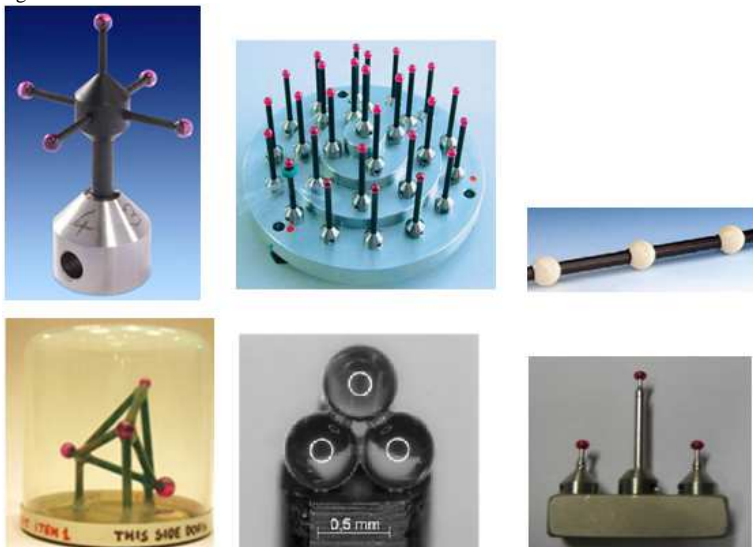
Essa situação levou a elaboração de corpos de referência para TC inspirados nos padrões já existentes para as tradicionais MMC. Tal abordagem apresenta a vantagem de possibilitar a intercomparação entre os tomógrafos e as tradicionais MMC, mas, devido aos diferentes aspectos construtivos e os princípios físicos, essa abordagem não tem conseguido sucesso total.[2]

Padrões com esferas de referência, como as mostradas na Figura 17, permitem a medição da distância entre os centros das esferas e possibilitam a verificação ou avaliação do máximo erro permissível em comprimentos (MPE_c). Devido à pequena influência que os processos de detecção de superfície e *beamhardening* tem sobre a medição do centro

da esfera, é possível verificar e corrigir o fator de escala⁵ do tomógrafo.[2][6][4]

Por outro lado eles são menos adequados para a calibração do processo de detecção de superfície uma vez que o material da esfera (rubi, aço, zircônio) difere dos materiais comumente utilizados em TC (plástico e alumínio). Além disso, o diâmetro é muito menor que as características medidas tradicionalmente.[2]

Figura 17 - Padrões com esferas de referência.

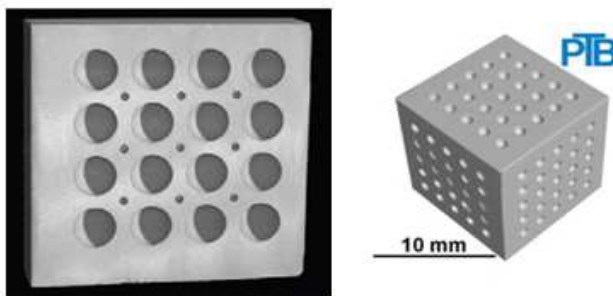


Fonte: adaptado [2][6][18]

⁵ O fator de escala pode ser entendido como a relação entre o comprimento do objeto e o comprimento da imagem do objeto obtida pelo detector. Devido à forma cônica do feixe de raios x, o fator de escala é diferente para o plano perpendicular ao detector que contenha a fonte de radiação das demais regiões do detector.

Outro conjunto de padrões, mostrado na Figura 18, foi inspirado nas placas de furos e esferas, bastante comuns para as tradicionais MMC. Eles permitem a medição das distâncias entre os centros das calotas, o que possibilita a determinação de desvios tanto em duas dimensões (no caso da placa de calotas) como em três dimensões (no caso do cubo de calotas). Isso permite a calibração do fator de escala e a determinação de qualquer anisotropia presente no tomógrafo. [2][6][17]

Figura 18 - Placa e cubo de calotas.



Fonte: adaptado [2]

Alguns outros padrões foram desenvolvidos com os mais variados propósitos. Um dos mais difundidos e mostrados na Figura 19 é o *stepcylinder*. Ele permite o ajuste dos parâmetros da medição de acordo com o material e profundidade de penetração, além da determinação da máxima profundidade de penetração. [2][4][6]

Figura 19—*Stepcylinder*.



Fonte: adaptado [2]

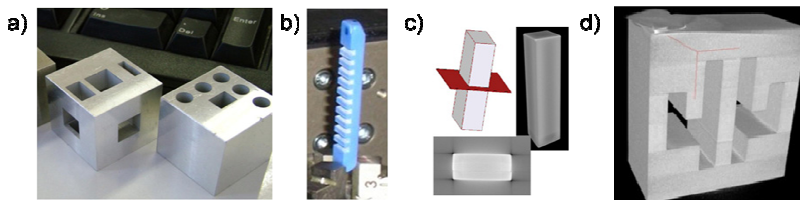
Há uma versão sugerida pela norma VDI/VDE 2630-1.2 que possui um furo concêntrico aos diâmetros internos. Essa versão possibilita a calibração de diâmetros externos e internos, além de separar os erros devidos ao fator de escala dos erros devidos ao processo de detecção de superfície. [19]

Como os cilindros são perfis fechados, o *stepcylinder* também possibilita a análise harmônica das suas superfícies. Entretanto, como ele não envolve a medição de distância ponto a ponto, ele não é adequado para a verificação e correção do fator de escala (relação voxel/milímetro)[2]. Além disso, como o mensurando é diferente para cada profundidade de penetração, ele não permite isolar as variações proveniente dos erros geométricos das variações proveniente das diferentes profundidades de penetração.

Outro tipo desenvolvido são padrões com faces paralelas. Eles são mais adequados para verificar a exatidão das medições de distâncias entre superfícies/pontos e, caso haja características internas e externas, é possível distinguir os efeitos associados ao processo de determinação da superfície e os processos associados ao fator de escala.[2]

Esse tipo de padrão, contudo, pode ser fortemente influenciado por artefatos que agem sobre as superfícies planas. A Figura 20 mostra alguns desses padrões.

Figura 20 - Padrões com faces paralelas.



Fonte: adaptado [2]

Usando diferentes larguras de parede de material e ar é possível uma melhor avaliação do efeito da profundidade de penetração sobre o indicador de tendência. O padrão “d”, chamado *cactusstep-gauge*, possibilita essa análise. [2][13]

Padrões que envolvem mais de um material também foram desenvolvidos a fim de analisar o comportamento do processo de determinação de superfícies nesse tipo de caso[2][20]. Alguns destes modelos podem ser visto na Figura 21.

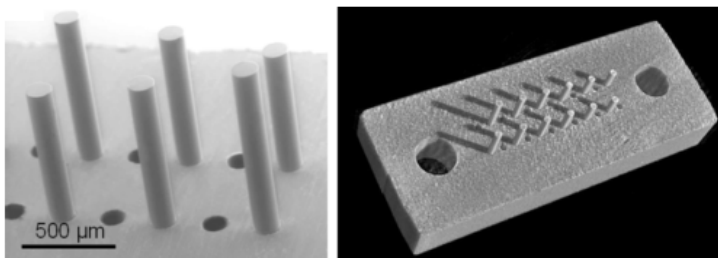
Figura 21 - Padrões para múltiplos materiais.



Fonte: adaptado [20]

Padrões para micro-TC também existem. A Figura 22 mostra um deles. Nesse padrão envolve a medição de diversos diâmetros internos e externos fabricados em fibra de vidro.[2][21]

Figura 22 - Padrão para micro-TC.



Fonte: adaptado [21]

Uma abordagem diferente, mas também em estudo, é a utilização de peças reais como padrão. A grande dificuldade é a calibração com baixos valores de incerteza e a estabilidade desses padrões. [2][4][6][22]

Eles têm sido utilizados para avaliar a influência dos aspectos específicos de tarefa de medição específicas, com suas variadas profundidades de penetração, sobre o desvio das distâncias entre esferas de rubi ou outros materiais fixadas dentro dos modelos[23]. Dois desses modelos podem ser vistos na Figura 23.

Figura 23 - Peças reais utilizadas como padrões.



Fonte: adaptado [23]

2.6. PROGRAMA BRAGECRIM E PROJETO CTMETRO

O BRAGECRIM é um programa de cooperação internacional que visa financiar e apoiar projetos de pesquisa entre grupos alemães e brasileiros na área de tecnologias avançadas de manufatura. [5][24][25]

O objetivo principal do programa é gerar conhecimento tecnológico para o desenvolvimento de soluções inovadoras visando à melhora da qualidade, produtividade e sustentabilidade de ambas as economias. Outra meta importante é a troca de conhecimento através de trabalhos e missões de pesquisadores de ambos os países. [22][23]

Dentro desse escopo, o projeto CTmetro conta com a participação da Universidade Federal de Santa Catarina, através do laboratório de metrologia (LABMETRO), da Universidade politécnica de Aachen, representada pelo laboratório de máquinas e ferramentas (WZL-Aachen) e a fundação CERTI (Centro de Referência em tecnologias inovadoras)[5][26]. Os seguintes pesquisadores estão envolvidos no projeto:

Pesquisadores Brasileiros

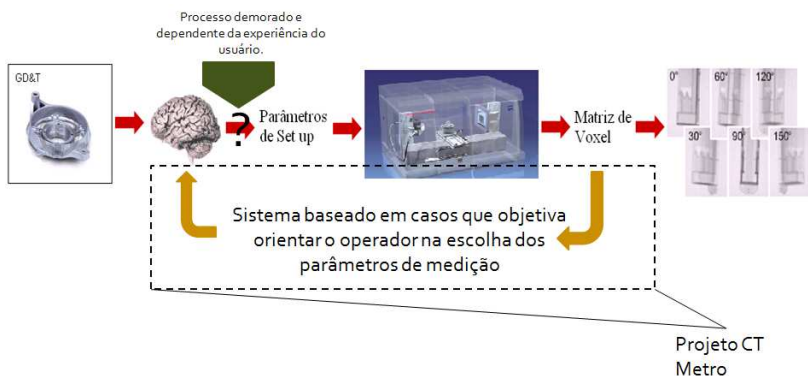
- Prof. Dr. Eng. Carlos A. Schneider (EMC/UFSC, Fundação CERTI, coordenador)
- Prof. Dr. Eng. Gustavo D. Donatelli (UFSC, Fundação CERTI)
- Prof. Dr. Eng. Rolf Schroeter (LMP/UFSC)
- Dr. Eng. Maurício de Campos Porath (Fundação CERTI)
- Msc. Eng. Vitor Camargo Nardelli (LabMetro)
- Eng. Rafael Pacheco dos Santos (LabMetro)

Pesquisadores Alemães

- Prof.Dr.Ing. Robert Schmitt (WZL/RWTH Aachen University, coordenador)
- Dr.Ing.Reinhard Freudenberg (WZL/RWTH Aachen University)
- Dipl.Ing. Christian Niggemann(WZL/RWTH Aachen University)
- Dipl.Ing. Sebastian Pollmanns (WZL/RWTH Aachen University)

O objetivo do projeto é melhorar o processo de medição através da geração e sistematização de conhecimento sobre a influência dos parâmetros de configuração(cuja definição é responsabilidade do operador) sobre o resultado final da medição. Com isso, espera-se reduzir o tempo de planejamento e medição da mesma forma que a incerteza no processo. O projeto culminará no desenvolvimento de um sistema protótipobaseado em casoscomo esquematicamente é mostrado na Figura 24. [5][26]

Figura 24—Representação esquemática do funcionamento do sistema baseado em casos a ser desenvolvido para auxiliar o operador na definição dos parâmetros de configuração



As tarefas de elaboração do sistema foram distribuídas por ambas as instituições e são realizadas simultaneamente em ambos os países.[5]

3. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES PREVISTAS

Conforme mostrado na sessão 2.5, várias peças padrão foram desenvolvidas para a verificação periódica, investigação científica dos tomógrafos e validação de simulações. Contudo, a maioria das peças desenvolvidas não leva em consideração os aspectos específicos da tarefa de medição e muito menos a sua grande diversidade. O presente trabalho, em consonância com as necessidades do projeto CTmetro, vem de encontro a essa necessidade e tem como objetivo o desenvolvimento e validação experimental de um conjunto de peças que emulem aspectos específicos das tarefas de medição desempenhadas por tomógrafos industriais e que sejam capazes de investigar assuntos importantes da tecnologia.

O desenvolvimento de uma base de montagem rápida e de um sistema de acoplamento que ajude na repetitividade do posicionamento das peças durante as várias medições também são foco do trabalho.

A medição das peças por meio de TC deve melhorar o entendimento sobre os fenômenos envolvidos, além de fornecer os dados iniciais do banco de dados (BD) que alimentará o software a ser desenvolvido.

O desenvolvimento do projeto das peças deve levar em consideração os princípios de engenharia de precisão juntamente com uma bem elaborada metodologia de projeto.

O processo de fabricação deve possibilitar a calibração das peças com baixos valores de incerteza e será definido durante o processo de desenvolvimento. Já a calibração deve ser feita em Máquina de medição por coordenadas de referência, de forma a garantir a rastreabilidade.

Por fim, a validação deve levar em consideração os aspectos relativos ao projeto de experimentose ser realizada comparando-se o perfil metrológico de um índice que represente a qualidade do processo de aquisição de projeções dessas peças com o comportamento de um padrão simples e uma peça real.

4. DESENVOLVIMENTO, PROTOTIPAGEM E CALIBRAÇÃO

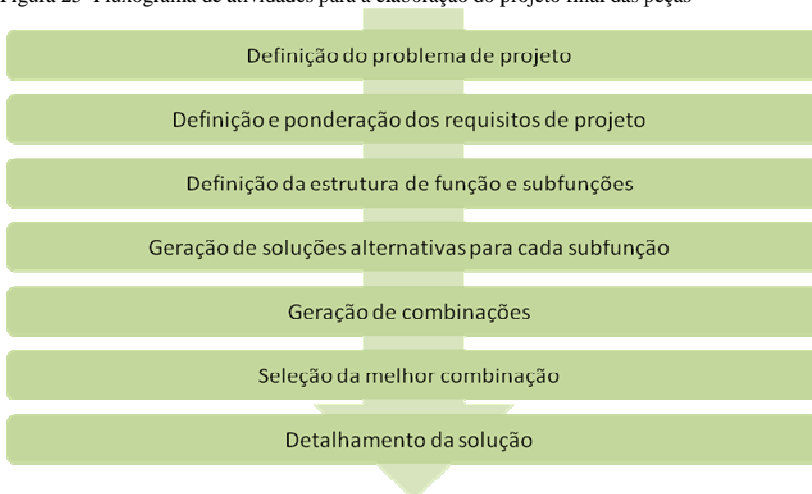
4.1. METODOLOGIA DE PROJETO

Para garantir que os objetivos sejam alcançados, a adoção de uma metodologia de projeto que minimize as decisões empíricas e interativas -além de levar em consideração os aspectos específicos da tecnologia- é extremamente importante.

De uma maneira geral as metodologias de desenvolvimento de projeto podem ser classificadas como sequenciais e simultâneas. Os modelos sequenciais caracterizam-se por apresentar processos sistemáticos para o desenvolvimento do projeto com ênfase na redução das incertezas durante o processo. São modelos que confiam fortemente no planejamento, antecipação e controle das atividades. Em geral, têm sido propostas para projetos de inovação incrementais como esse, prescrevendo instrumentos para a solução sistemática de problemas. [28]

Dentro desse contexto, uma das metodologias mais utilizadas foi proposta por Paul e Beitz e representa, em essência, a linha de pesquisa alemã quanto ao processo de projeto. Tal abordagem é colocada de maneira bastante similar na norma VDI 2221. Tal metodologia foi adaptada e o processo de desenvolvimento do projeto foi estruturado como mostra a Figura 25. [27][29]

Figura 25—Fluxograma de atividades para a elaboração do projeto final das peças



A definição do problema de projeto é a primeira fase de desenvolvimento e uma das mais importantes. Ela deve gerar uma descrição que não restrinja soluções não convencionais do problema.

Tal fase leva a definição dos requisitos de projeto que é o ponto de partida na resolução do problema proposto. A lista deve distinguir os requisitos obrigatórios daqueles desejáveis, além de quantificar a importância de cada a fim de subsidiar o processo de tomadas de decisões.

Somente então é possível elaborar uma função global que, baseada no fluxo de energia, material e informação, expressa o relacionamento entre entradas e saídas independente da solução. Um melhor detalhamento das funções atingindo um nível menor de complexidade corresponde ao passo de estabelecimento da estrutura de subfunções.

Em projetos originais as subfunções e o relacionamento entre elas não são bem conhecidos. Neste caso, o estabelecimento da estrutura de subfunções constitui um dos passos mais importantes do projeto conceitual. [29]

O passo seguinte, a pesquisa por princípios de soluções, deve ser realizado para satisfazer os problemas-chave identificados no passo anterior. Para concretizar este passo faz-se uso da pesquisa bibliográfica, análise de sistemas naturais, análise de sistemas existentes, analogias etc.

Métodos intuitivos também podem ser usados. Destaca-se nesse caso o "*brainstorming*" como técnica básica na solução do problema. Além desta, algumas técnicas convencionais são usadas para suportar a criatividade. Entre elas, tem-se a técnica da palavra-chave. Devem-se diversificar as ideias tanto quanto possível e fazer esquemas e anotações para auxiliar o estabelecimento das concepções.

Adicionalmente, tem-se a combinação dos princípios de solução que objetiva satisfazer a função global. A base de tais combinações é a estrutura de subfunções. Deve-se assegurar a compatibilidade geométrica e física entre os princípios, o fluxo regular de energia, material e informação, a viabilidade técnica e econômica. Nestas combinações pode-se fazer uso de esquemas de classificação denominados de matriz morfológica nos quais as subfunções são associadas com as correspondentes soluções possíveis.

Uma vez que a habilidade de produzir novas ideias tenha sido exaurida, a etapa de avaliação é iniciada. Esse passo corresponde à seleção das combinações identificadas no passo anterior. Isso pode ser feito, inicialmente, eliminando as combinações tecnicamente

inadequadas e em seguida ordenando as combinações restantes segundo alguns critérios. Os principais critérios são a compatibilidade com a tarefa global, satisfação dos requisitos obrigatórios, desempenho, custos e preferências pessoais. Finalmente, conclui-se este passo com um conjunto de soluções realizáveis. [28]

Por fim, o projeto detalhado estabelece as descrições definitivas para a disposição dos elementos, forma, medidas, acabamentos superficiais, materiais, e o reexame do projeto e custos de fabricação. São elaborados os documentos finais do projeto na forma de desenhos que possibilitam a realização física das soluções. Faz-se uso de uma série de normas e procedimentos padrões de acordo com a empresa na qual o projeto será prototipado. [27][28][29]

4.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO

4.2.1. DEFINIÇÃO E PONDERAÇÃO DOS REQUISITOS DE PROJETO

A definição correta, abstrata e mais abrangente possível do problema de projeto é reconhecida como um dos mais importantes passos para uma boa solução. Por isso, a definição mais abstrata e abrangente possível é importante para evitar que soluções inovadoras sejam descartadas. [30]

Além disso, a definição correta do problema requer uma cuidadosa exploração de informações sobre a situação das tecnologias envolvidas (estado da arte). Somente assim podemos perceber, entender e focalizar os aspectos relevantes para a solução efetiva do problema.

No caso desse trabalho, o problema de projeto está intimamente ligado ao objetivo dessa dissertação e foi estruturado a partir de uma revisão bibliográfica da TC associado ao escopo do projeto CTmetro e pode ser descrito da seguinte maneira:

“Desenvolver uma solução na forma de um ou mais artefatos calibráveis para avaliar o desempenho metrológico da tomografia computadorizada industrial na medição geométrica.”

Tal definição leva a elaboração e ponderação dos requisitos de projeto. Tais processos orientam a tomada de decisões e comprometem as decisões futuras, constituindo-se peça-chave do sucesso do projeto. A lista de requisitos deve constituir-se o ponto de partida na execução de

projeto e deve ser mantida atualizada com as variações surgidas no decorrer do mesmo. [27]

Durante a elaboração dos requisitos deve-se distinguir entre os obrigatórios e os desejáveis. Os obrigatórios devem ser atendidos sob quaisquer circunstâncias. Já os desejáveis devem ser atendidos em função de critérios técnicos, principalmente. Além disso, alguns métodos e recomendações podem auxiliar no desenvolvimento da lista de requisitos. Um dos mais comuns, utilizado no desenvolvimento dos requisitos desse trabalho, é o *Brainstorming* (tempestade de ideias).

Esse método propõe que um grupo de pessoas se reúna e se utilize das diferenças em seus pensamentos e ideias para que possam chegar a um denominador comum eficaz e com qualidade, gerando ideias inovadoras que levem o projeto adiante. [31]

É preferível que as pessoas que se envolvam nesse procedimento sejam de setores e competências diferentes, pois suas experiências diversas podem colaborar com a tempestade de ideias que se forma ao longo do processo de sugestões e discussões. Além disso, nenhuma ideia é descartada ou julgada como errada ou absurda. Todas são ouvidas e trazidas até o processo de *brainwriting*, que se constitui na compilação de todas as ideias ocorridas no processo de *brainstorming*, evoluindo, assim, até a chegada da lista efetiva.

A conclusão desta fase se dá com o acordo entre os membros da equipe a respeito da lista de requisitos estabelecida. No caso desse trabalho, os requisitos de projeto são compilados na Tabela 2. Esta serviu de base às etapas seguintes do processo de projeto.

Tabela 2 - Requisitos de projeto

Requisitos de projeto	
Descrição:	Obrigatório?
1. Ter superfícies de medição com acabamento adequado	Sim
2. Ter superfícies de medição acessíveis para MMC	Sim
3. Ter módulos que calibráveis independentemente	Sim
4. Transparente à radiação x	Sim
5. Tamanho adequado para TC típico de 225 keV	Sim
6. Baixo número de módulos	Não
7. Baixo custo de produção	Não
8. Ser geometricamente estável no tempo	Sim
9. Ter dimensão externa presente	Sim
10. Ter dimensão interna presente	Sim
11. Ter distâncias entre centros presentes	Sim
12. Ter desvio de forma presente	Sim
13. Apresentar variedade de espessuras	Sim

14. Apresentar variedade de tamanhos	Sim
15. Representar materiais típicos de TC	Sim

Os critérios 6 e 7 foram considerados não obrigatório (ou seja, desejáveis) já que eles representam requisitos de aspecto econômico que podem ser contornados.

Já a ponderação dos requisitos utilizou o método de comparação par-a-par para o estabelecimento de uma hierarquia entre os requisitos determinados. Tal método classifica cada requisito como de maior, igual e menor importância em relação a outro requisito (por isso comparação par-a-par) e conferindo valores numéricos⁶ para esse conceito. Tais valores, então, são dispostos na forma matricial e o somatório dos valores dispostos em linha é indicativo da importância de cada item em uma escala de zero a dez. [32][33]

Tal método foi aplicado aos requisitos de projeto obtendo os resultados mostrados na Tabela 3. A matriz de comparação encontra-se no Apêndice 1 desse trabalho.

Tabela 3 - Ponderação dos requisitos de projeto

Descrição	Peso
1.Ser geometricamente estável no tempo	10,0
2.Transparente à radiação x	10,0
3.Ter superfícies de medição acessíveis para MMC	7,8
4.Ter superfícies de medição com acabamento adequado	7,4
5.Tamanho adequado para TC típico de 225 keV	7,4
6.Representar materiais típicos de TC	6,9
7.Ter dimensão externa presente	3,5
8.Ter dimensão interna presente	3,5
9.Ter desvio de forma presente	3,5
10.Apresentar variedade de espessuras	3,5
11.Ter distâncias entre centros presentes	3,5
12. Apresentar variedade de tamanhos	3,5
13.Ter módulos que calibráveis independentemente	1,7
14.Baixo número de módulos	0,4
15.Baixo custo de produção	0,4

4.2.2. DEFINIÇÃO DE FUNÇÃO E SUBFUNÇÕES

⁶ Valor dois para maior importância, valor um para igual importância e valor zero para menor importância.

Com o problema definido textualmente e com requisitos elaborados e ponderados é possível definir a função global e a estrutura de subfunções do projeto.

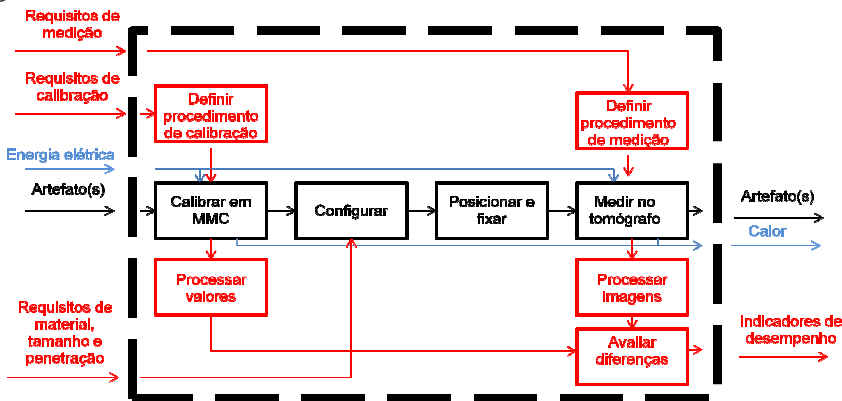
A função global deve expressar os relacionamentos entre as grandezas de entrada e de saída do sistema técnico independente das soluções pré-concebidas. A Figura 26 mostra a função estabelecida para esse projeto.

Figura 26 - Função global que representa as correlações entre grandezas de entrada e saída do projeto



A partir da função global, é definida a estrutura de subfunções do projeto que procura descrever o sistema técnico de uma maneira mais simples, mas preservando a abstração. Na Figura 27 podemos visualizar as subfunções com suas grandezas de entrada e saída e como elas se relacionam.

Figura 27 - Estrutura de subfunções que representa mais detalhadamente as relações entre as grandezas de entrada e saída



A partir da estrutura de subfunções foi possível identificar que a definição da geometria de medição e variação do tamanho, penetração e material da peça a ser medida além do processo de posicionamento e

materiais das peças são os problemas chave para o projeto dos artefatos de medição.

4.3. GERAÇÃO DE PRINCÍPIOS DE SOLUÇÕES

A solução individual de cada problema chave e a posterior combinação delas possibilitam a elaboração de concepções que satisfazem a função global do projeto.

Tais soluções foram elaboradas a partir de métodos de criatividade como *brainstorming*, bem como o mapeamento de tecnologias que satisfaçam o problema. Tais soluções são agrupadas conforme o problema chave e mostradas abaixo.

4.3.1. GEOMETRIA DE MEDIÇÃO

Apesar da imensa possibilidade de geometrias passíveis de ser utilizadas, os processos criativos e a pesquisa bibliográfica indicaram como bons candidatos apenas três soluções.

A primeira baseia-se na medição da distância entre centros de esferas ou círculos estrategicamente medidos em cilindros (ver figura 19). Isso possibilitaria uma avaliação do erro de escala, mas não representa muito bem o processo de medição [2].

Uma variação possível seria o ajuste de formas geométricas (círculos, planos etc.) pelo centro das esferas ou dos círculos. Nesse caso seria possível a criação de uma geometria ajustada que independesse dos processos de extração de superfície.

Uma abordagem um pouco diferente é a medição da distância entre planos com ou sem colunas de ar entre elas. Esse tipo de solução apresenta uma avaliação mais realística do processo de medição, mas sofre com a ação de artefatos como *beamhardening* que dificultam a medição dessas superfícies. Além disso, ela já tem sido amplamente utilizada em alguns padrões como o “cactus” e blocos padrão. [2]

A última possibilidade utiliza superfícies fechadas como cilindros e cones. Tais geometrias possibilitam a medição de círculos ou elipses que, além de representar bem a tarefa de medição, permite a comparação entre o perfil medido e calibrado e a análise dos pontos obtidos no espectro de frequência (abordagem bastante comum em análise dimensional). [14]

Essa abordagem permite a obtenção de uma gama de informações substancialmente maior que os métodos que se baseiam apenas na análise do domínio do espaço. [14]

4.3.2. SOLUÇÃO PARA MUDAR MATERIAL, TAMANHO E PENETRAÇÃO

Para a variação da espessura de penetração a solução passa inerentemente pela adição de massa em algum ponto do sistema. Essa adição poderá ocorrer externamente, com a adição de sobrepostos, ou internamente à geometria, com a adição de insertos.

Uma solução possível é a utilização de um conjunto decilindros fabricados no mesmo material do corpo base que, dependendo da tarefa de medição a ser emulada, são posicionados entre as superfícies de medição. As vantagens dessa opção seria que o tamanho total do sistema não seria acrescido, já a desvantagem é que a variação de espessura fica restrita a um máximo valor.

A outra opção é a utilização de um conjunto de anéis externos fabricados no mesmo material que são posicionados na região externa a superfície de medição. Tal solução não comprometeria a profundidade de penetração, mas incrementaria em muito o tamanho da peça.

Independentemente da solução, há a necessidade de um sistema de acoplamento sem grandes exigências de repetitividade e precisão uma vez que o objetivo é apenas aumentar a profundidade de penetração.

Já para o sistema de variação de material os principais requisitos são a estabilidade dimensional além da representatividade quanto à tarefa de medição típica e translucidez aos raios X.

Dentro desse contexto, duas boas opções são as ligas de alumínio e plásticos de engenharia. Ambos apresentam baixa densidade (o que permite poder de penetrabilidade adequado), além de representar bem o processo de medição [6].

Entretanto, como existe uma vasta gama de ligas de alumínio e tipos de plástico de engenharia, deve-se dar preferência àqueles que apresentarem menor coeficiente de dilatação térmica. Outra opção é o aço, mas o pequeno poder de penetração dos raios X nesse material limitaria o tamanho.

Por fim, quanto maior o número de peças com tamanho diferente, mais representativa seria a medição em relação à tarefa de medição realizada por tomógrafos industriais.

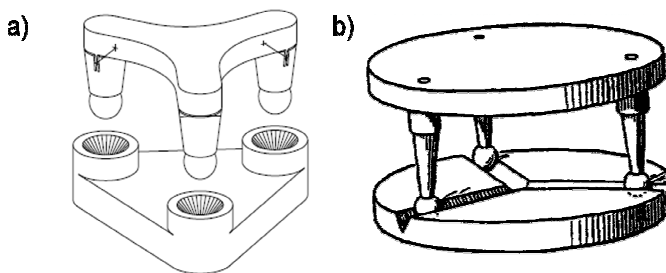
Contudo, limitações quanto ao custo, processos de fabricação, disponibilidade de apalpadores e a realidade das tarefas de medição realizadas restringem o número de opções à no máximo três peças.

4.3.3. SOLUÇÃO PARA POSICIONAR E FIXAR

Foi identificada uma grande variedade de tipos de acoplamento. A maioria deles é utilizada para a transmissão de potência e não apresenta a capacidade de um posicionamento preciso e repetitivo entre as peças[34]. Apenas dois tipos foram identificados como possíveis soluções para esse problema chave. Eles são acoplamento quase cinemático e acoplamento cinemático. [35].

O acoplamento quase cinemático ocorre pelo contato de uma superfície curva com um cone ou cilindro o que reduz os pontos de contato a apenas uma linha. Tal fato melhora a repetitividade, mas em compensação, diminui a rigidez da união[35][36]. A Figura 29.a mostra esse tipo de acoplamento.

Figura 28–Soluções para o problema chave para posicionar e fixar. A figura “a” representa acoplamento quase cinemático e a “b” o acoplamento cinemático.



A última solução levantada é o acoplamento cinemático que se baseia no contato de uma esfera com um plano, reduzindo o número de pontos de contato para apenas um. Isso gera uma excelente repetitividade de posicionamento. [35][36]

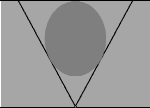
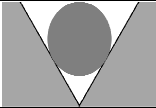
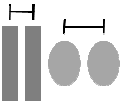
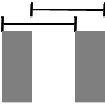
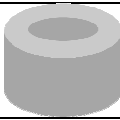


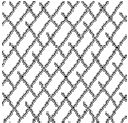
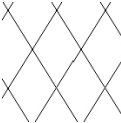
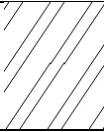


O limite principal para a repetitividade de um acoplamento cinemático é o acabamento superficial das regiões de contato, enquanto que a carga suportada é limitada pela tensão máxima de escoamento[36][35]. A Figura 29.b mostra esse tipo de acoplamento.

4.4. GERAÇÃO DAS COMBINAÇÕES

As soluções encontradas na seção anterior podem ser compiladas utilizando a matriz morfológica. Nela, os problemas chave do projeto são posicionados na coluna da esquerda e as possíveis soluções são dispostas na mesma linha à direita do título da subfunção[27]. Tal matriz para esse projeto é mostrada na Tabela 4.

Pela utilização da matriz morfológica, a equipe de projeto teve a oportunidade de inovar na forma final do projeto, com base nas potenciais tecnologias disponíveis. Há a possibilidade também da criação de um banco de soluções que pode fomentar desenvolvimentos futuros.

Tabela 4—estrutura matricial, denominada matriz morfológica, que sumariza todas as soluções encontradas.

Prob. chaves	Soluções		
Acoplamento entre módulos	 Quase cinemático	 Cinemático	
Geometria de medição	 Esferas e cilindros	 Planos	 Superfície fechada
Espessura de penetração	 Insertos (cilindros)	 Sobreposto (Anéis)	
Materiais dos módulos	 Alumínio	 Plástico engenharia	 Aço
Tamanho dos módulos	 Dois tamanhos	 Três tamanhos	

A forma matricial propiciou a geração das concepções iniciais através da combinação dos diversos princípios de solução.Tais

combinações geraram um universo de soluções ao qual a solução final do projeto deve pertencer.

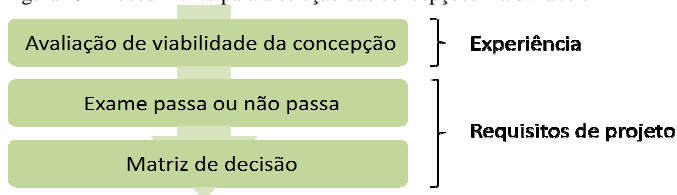
4.5. SELEÇÃO DA MELHOR COMBINAÇÃO

Com o fim da fase criativa se faz necessário selecionar as concepções que melhor satisfazem os requisitos de projeto. A dificuldade envolvida nesta tarefa encontra-se na principal característica da fase de projeto conceitual: informações limitadas e abstratas. Portanto, se faz necessária a utilização de métodos ou procedimentos sistemáticos, compatíveis com a limitação de informações, e que auxiliem na tomada de decisões quanto a seleção da melhor concepção.

Uma possibilidade é a utilização de filtros consecutivos que avaliam a viabilidade e o atendimento dos requisitos essenciais do projeto e de matriz de decisão para indicar a concepção mais adequada para o desenvolvimento. Tal esquema está mostrado na Figura 29.

A etapa de julgamento da viabilidade consiste na classificação das concepções em “não viáveis”, “condicionalmente viáveis” e “viáveis”. Esses conceitos são baseados na experiência e conhecimento do projetista sobre as tecnologias. Mesmo dessa forma a concepção não deve ser totalmente descartada, deve ser apenas reduzido o seu grau de importância para o desenvolvimento.

Figura 29—Procedimento para a seleção das concepções mais viáveis



Algumas concepções julgadas “não viáveis” são aquelas que envolvem aço próximo à geometria de medição. A pequena capacidade de penetração dos raios X nesse material não permite que aspectos relativos à tarefa de medição como profundidade de penetração sejam analisados[2].

Já na etapa de exame passa ou não passa as soluções que forem julgadas inadequadas para requisitos considerados essenciais são eliminadas do universo de soluções. Isso aconteceu com as soluções que envolveram sobrepostos. As concepções baseadas nessa solução foram

consideradas “inadequadas” por não representarem peças com tamanhos típicos das medidas em tomógrafos de 225 keV.

O mesmo aconteceu com concepções que previam apenas duas variações de tamanho. Estas foram julgadas “inadequadas” por não representarem o espectro de tamanho satisfatório.

Por fim, as concepções que envolviam a medição da distância entre planos foram consideradas “condicionalmente viáveis” uma vez que alguns conceitos já foram desenvolvidos com esse tipo de abordagem. O mesmo pode ser dito da medição de distância entre os centros de esferas ou círculos, contudo, a utilização deste para o ajuste de outras superfícies parece ser uma solução inovadora e promissora. Conforme mostrado na Figura 30, apenas as concepções que envolvem algumas soluções foram consideradas na matriz de decisão.

Figura 30 - Concepções consideradas para matriz de decisão

Concepção que possuam:

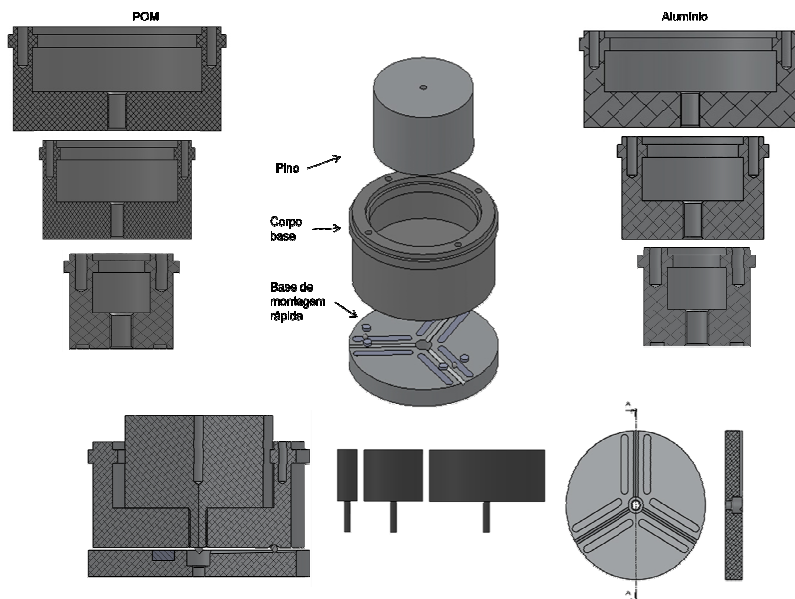
1. Acoplamento cinemático ou quase cinemático entre corpo base e base de montagem rápida
2. Acoplamento por pinos entre corpo base e módulo de variação de espessura
3. Fabricadas em Alumínio ou Plástico de engenharia
4. Geometria de medição formada por superfície fechada ou ajustada a partir do centro de esferas ou círculos
5. Utilizam insertos
6. Fabricadas em três tamanhos

**Matriz de
Decisão**



Por fim, todos os filtros acabaram selecionando apenas duas concepções. Elas são a concepção “A” que é mostrada na figura 34 e a concepção “B” que é mostrada na Figura 32. Ambas envolvem seis corpos bases e seis insertos fabricados em alumínio e plástico de engenharia. Além disso, uma base de montagem rápida com acoplamento cinemático utilizando esferas de aço também foi projetada.

Figura 31 - Concepção alternativa “A”



A geometria de medição é composta por duas superfícies fechadas (cilindros), denominadas pista interna e pista externa, além de contemplar quatro furos que possibilitam a medição de círculos circunscritos.

O ajuste de um círculo, através dos centros dos quatro furos, permite a criação de uma geometria que independe do processo de determinação de superfície. A comparação do comportamento metrológico desse círculo ajustado com círculo medidos nas pistas interna e externa permite a análise do processo de determinação de superfície.

Os círculos medidos sobre a pista interna e externa permitem a investigação das características do processo de medição por TC através de uma abordagem harmônica dos perfismedidos.

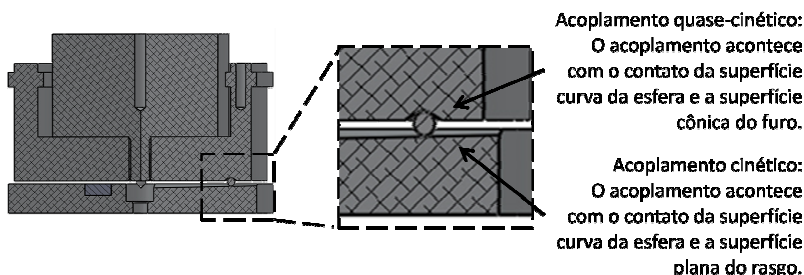
Já os inserts, sistema de variação de espessura, consistem em pinos de diferentes diâmetros que quando posicionados no centro do corpo base permitem a variação do valor e localização da profundidade de penetração máxima.

Nessa avaliação, a variação do comportamento metrológico associado à variação da profundidade de penetração não se confunde

com o erro geométrico do mensurando. Isto é possível porque, diferentemente do que ocorre com o *stepcylinder*, o mensurando é o mesmo para todos os espectros de penetração.

Já a união entre o corpo base e a base de montagem rápida foi realizada utilizando-se esferas de aço de diâmetro três milímetros que, em relação ao corpo base, formam um acoplamento do tipo quase cinético e com a base de montagem rápida um acoplamento do tipo cinético, como mostrado na Figura 32. Ambos com boas características de repetitividade.

Figura 32 - Acoplamento concepção A



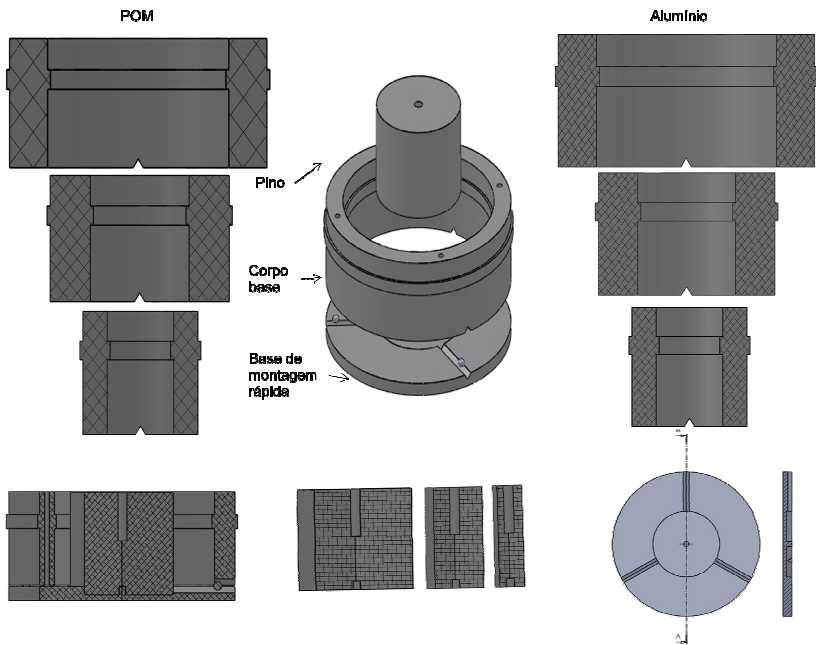
Por fim, os insertos que possibilitam a variação de espessura utilizaram o acoplamento por pinos para o seu posicionamento no sistema. É justamente nessa solução que se encontra a principal diferença entre as concepções A e B.

Na primeira solução, como mostrado na Figura 32, os insertos se fixam ao corpo base através do acoplamento por pino rosqueado na parte inferior do corpo base. Já na segunda solução, como mostra a Figura 34 o pino é fixado diretamente na base de montagem rápida e a parte inferior do corpo base é vazada.

As duas concepções foram levadas em consideração na matriz de decisão que considerou os requisitos de projeto e suas ponderações como critérios de decisão. As notas foram dadas com base na experiência dos envolvidos no projeto e o resultado final é mostrado na Tabela 5.

Os valores atribuídos às notas foram de zero a dez que e quando multiplicados pela importância dos requisitos geram um índice de diferenciação do requisito (I.D.R.). O somatório de todos os I.D.R. geram o índice de diferenciação (I.D.) que indica qual é a melhor concepção.

Figura 33 - Concepção alternativa "B"



Devido à similaridade das concepções, as notas conferidas foram bastante semelhantes. A diferença deu-se no requisito relativo ao custo de produção e a estabilidade geométrica.

A concepção “A” teve uma nota superior uma vez que durante a usinagem a fixação mais rígida na máquina ferramenta reduz a deformação pela fixação. Além disso, a ausência de roscas em furos de pequeno diâmetro reduz o custo de fabricação.

Tabela 5 - Matriz de decisão para a definição da concepção mais adequada para o desenvolvimento

Descrição	A	Peso	I.D.R.	B	Peso	I.D.R.
1. Ser geometricamente estável	10	10,0	100,0	6	10,0	60,0
2. Transparente à radiação x	10	10,0	100,0	10	10,0	100,0
3. Superfícies de medição acessíveis	8	7,8	62,6	8	7,8	62,6
4. Acabamento adequado	9	7,4	66,5	9	7,4	66,5
5. Tamanho típico para TC de 225 keV	6	7,4	44,3	6	7,4	44,3
6. Representar materiais típicos de TC	10	6,9	69,5	10	6,9	69,5
7. Ter dimensão externa presente	10	3,5	35,0	10	3,5	35,0

8.Ter dimensão interna presente	10	3,5	35,0	10	3,5	35,0
9.Ter desvio de forma presente	10	3,5	35,0	10	3,5	35,0
10. Grande espectro de espessuras	8	3,5	27,8	8	3,5	27,8
11. Distância entre centros	10	3,5	35	10	3,5	35
11. Grande variedade de tamanhos	8	3,5	27,8	8	3,5	27,8
12.Calibráveis independentemente	8	1,7	13,8	8	1,7	13,8
13.Baixo número de módulos	8	0,4	3,4	8	0,4	3,4
14.Baixo custo de produção	10	0,4	4,3	8	0,4	3,4
I.D.			656,1			615,1

Apesar da pequena diferença a concepção “A” mostrou-se a mais adequada para a continuação do projeto.

4.6. DETALHAMENTO DA SOLUÇÃO

Tendo-se elaborado a concepção final durante o projeto conceitual, o entendimento e a configuração das ideias pode agora ser concretizado. Durante a etapa de detalhamento da concepção, os projetistas devem determinar as formas e acabamento superficial dos materiais e processos que utilizados.

Conforme definido no projeto conceitual, os módulos serão fabricados em alumínio e plástico de engenharia. Contudo, a grande variedade de materiais dessas duas classes (principalmente em relação ao plástico) exige a opção pelos que apresentam baixo ou muito bem definido coeficientes de dilatação térmica. Nesse contexto, o Alumínio 6351 e o plástico Poliacetal (POM) apresentam-se em destaque.

A forma cilíndrica da concepção final propiciou utilização de processos produtivos como torneamento para a fabricação. Furação, para a realização dos quatro furos; e retificação, para o acabamento superficial adequado da pista interna e externa, também foram necessários.

As dimensões principais dos corpos bases são 90, 60 e 40 milímetros para a pista externa e 66, 36 e 16 milímetros para a pista interna. Os furos pequenos apresentam diâmetro de 4 milímetros e estão dispostos a 39, 24 e 14 milímetros do eixo principal. A altura, por sua vez, é de 25 milímetros da superfície de topo até o início da superfície de fixação dos pinos.

Tanto as pistas interna e externa quanto a superfície interna dos 4 furos pequenos, para garantir a calibração com baixos valores de incerteza, necessitam um acabamento superficial refinado. Os valores

$deR_a = 0,8 \mu\text{m}$ satisfazem essa necessidade e foram indicados para essas superfícies.

Na face inferior, os corpos base apresentam três furos cônicos de diâmetro de 5 milímetros e abertura de 60 graus. Tais furos acomodam três esferas de aço com 3 milímetros de diâmetro que constituem um acoplamento quase cinemático.

Próximo são colocados dois imãs, um em cada lado da esfera, que associados a um inserto metálico, fixado na base de montagem rápida, aumentam a força de atração entre as peças permitindo uma pequena inclinação do conjunto.

Tais imãs são cilíndricos com 5 milímetros de diâmetro e 1,5 de profundidade. A classe magnética é N35 e a direção de atração garante que não ocorra deformação na direção de medição.

Tanto os imãs como as esferas foram fixadas com auxílio do adesivo estrutural SCOTCH WELD® DP-810 de acordo com as especificações do produto.

Já a base de montagem rápida constitui-se de um disco de alumínio com um furo central de 5,3 milímetros e três rasgos em “V” com profundidade de 1,5 milímetros e 45 graus de abertura.

Por fim, os pinos são cilíndricos de diâmetro 60, 30 e 10 milímetros e altura de 35 milímetros. Tal altura garante 10 milímetros de distância entre o plano de topo do pino e do corpo base garantindo uma fácil remoção e posicionamento dos pinos.

Mais informações sobre a geometria dos corpos base e da base podem ser encontradas nos desenhos técnicos que constituem os Apêndice 2 desse trabalho.

4.7. PROTOTIPAGEM

Uma vez o projeto elaborado, ele seguiu para a prototipagem e calibração. Na prototipagem as esferas, insertos metálicos para a base de montagem rápida e o adesivo para fixação foram adquiridos no material, quantidade e dimensões desejadas. Já os anéis, pinos e a base foram fabricados a partir de barras de diâmetro de 100 milímetros e comprimento de 1 metro. O conjunto final pode ser visualizado na Figura 34.

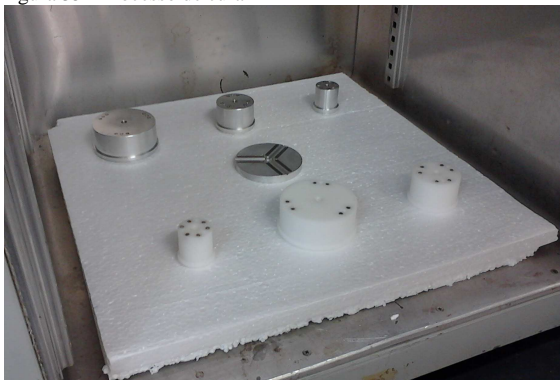
Durante a verificação dimensional verificou-se que tanto a pista interna quanto a pista externa em alguns anéis de POM apresentavam acabamento superficial inadequado. Tal fato dificulta a calibração das peças com baixo valor de incerteza o que obrigou o retrabalho.

Figura 34 - Conjunto de peças



Por fim, o processo de fixação dos ímãs e esferas foi realizado nas dependências do LABMETRO, em Florianópolis, em duas etapas. Na primeira, as peças são mantidas unidas por dois minutos e na segunda as peças são aquecidas até a temperatura de 50 graus Celsius por 30 minutos (processo de cura). A Figura 35 mostra esse passo.

Figura 35 - Processo de cura



4.8. CALIBRAÇÃO

A calibração foi realizada em máquina de medição por coordenada Zeiss ZMC550 no Centro de Metrologia e Instrumentação da Fundação CERTI, em Florianópolis. A incerteza de medição, por sua vez, foi estimada seguindo as diretrizes da norma ISO/TS 15530-3.

As calibrações foram compostas por quatro etapas: limpeza e estabilização térmica; qualificação dos apalpadores; localização; e, medição das peças e registro das informações.

O processo de limpeza foi realizado primeiramente com ar comprimido e posteriormente com flanela embebida em álcool etílico. As peças foram, então, colocadas no ambiente de medição com quatro horas de antecedência.

No fim dessas quatro horas, a temperatura do ambiente de medição foi verificada, as peças foram fixadas no volume de medição e o apalpador qualificado.

A localização da peça no volume de medição foi a próxima etapa. Isso foi realizado com a medição de 12 pontos no plano superior, oito na pista externa e quatro num dos furos, a partir de agora denominado furo 1, a uma profundidade de 5,5 milímetros.

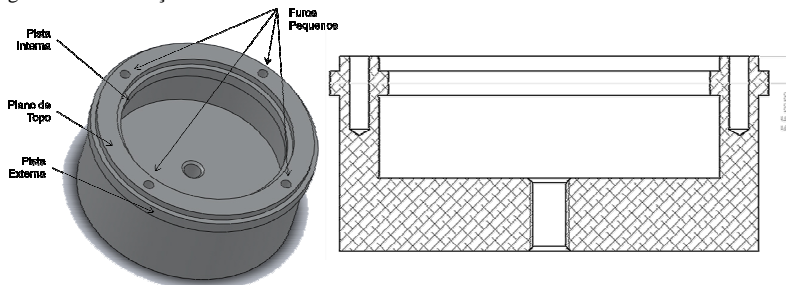
Esse furo se diferencia dos outros porque este é o único cujo eixo principal coincide com o eixo principal de um dos furos cônicos da superfície oposta. Os demais furos foram denominados 2, 3 e 4 em sentido anti-horário.

Todos os pontos medidos foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados gerando o sistema de coordenadas do mensurando que será utilizado para a definição do sistema de coordenadas utilizado. Por fim, na calibração propriamente dita foram medidos seis círculos em diferentes geometrias. Uma circunferência na pista interna, outro na pista externa e os demais nos furos. Os intervalos de amostragem são mostrados na Tabela 6 e a profundidade de medição foi a mesma utilizada durante a localização da peça no volume de medição, ou seja, 5,5 milímetros. Os pontos foram novamente ajustados por mínimos quadrados e o valor encontrado foi denominado de resultado base da medição. A figura ajuda na compreensão da posição dos mensurandos.

Tabela 6 - Intervalo de amostragem do processo de calibração

	Furos Menores	Pista Interna	Pista Externa
Anel 90 (POM e AL)	0,030 mm	0,030 mm	0,050 mm
Anel 60 (POM e AL)	0,030 mm	0,060 mm	0,080 mm
Anel 40 (POM e AL)	0,030 mm	0,010 mm	0,035 mm

Figura 36 - localização dos mensurandos calibrados



Por fim, o relatório de medição e os demais arquivos temporários gerados durante o processo foram arquivados para posteriores análises.

A etapa de medição foi repetida mais duas vezes totalizando três repetições e no final a temperatura da sala de medição foi verificada e registrada novamente.

Os resultados obtidos juntamente com o relatório de calibração da máquina foram informações básicas para a última etapa, o balanço de incertezas. Este levou em consideração a repetitividade (distribuição normal), a resolução (distribuição retangular) e o máximo erro permissível da máquina (distribuição normal) como fontes de erro da calibração.

Já o resultado base foi obtido a partir da média aritmética dos resultados obtidos em cada medição. Como a temperatura apresentou variação desprezível durante a calibração foi julgado desnecessário qualquer tipo de correção de erros devido à temperatura.

Tal processo culminou com o resultado da calibração, mostrado na Tabela 7, através da apresentação do resultado base e da incerteza da medição. As matrizes que apresentam o balanço de incerteza e mais informações sobre a estratégia de medições são encontrados no Apêndice 3 desse trabalho.

Tabela 7 - Resultado da calibração

Calibração		
	Resultado base, [mm]	Incerteza da medição, [mm]
Anel 90 (POM)		
Pista interna	65,7974	0,0034
Pista externa	90,4028	0,0035
Furo 1	3,9585	0,0030
Furo 2	3,9678	0,0030
Furo 3	3,9620	0,0030
Furo 4	3,9592	0,0030
Furo ajustado	77,9139	0,0035
Anel 60 (POM)		
Pista interna	36,1022	0,0033
Pista externa	60,2158	0,0034
Furo 1	3,9670	0,0030
Furo 2	3,9610	0,0030
Furo 3	3,9590	0,0030
Furo 4	3,9581	0,0030
Furo ajustado	48,0027	0,0034
Anel 40 (POM)		
Pista interna	15,9894	0,0031
Pista externa	40,1191	0,0035
Furo 1	3,9730	0,0030
Furo 2	3,9802	0,0030
Furo 3	3,9656	0,0030
Furo 4	3,9817	0,0030
Furo ajustado	28,0193	0,0033
Anel 90 (Al)		
Pista interna	65,9012	0,0034
Pista externa	90,2367	0,0035
Furo 1	3,9837	0,0030
Furo 2	3,9855	0,0031
Furo 3	3,9843	0,0030
Furo 4	3,9840	0,0030
Furo ajustado	77,9947	0,0034
Anel 60 (Al)		
Pista interna	35,8542	0,0032
Pista externa	60,2622	0,0033
Furo 1	3,9838	0,0030
Furo 2	3,9831	0,0030
Furo 3	3,9836	0,0030
Furo 4	3,9852	0,0030

Furo ajustado	47,9898	0,0032
Anel 40 (Al)		
Pista interna	16,2782	0,0031
Pista externa	40,4595	0,0032
Furo 1	3,9868	0,0030
Furo 2	3,9838	0,0030
Furo 3	3,9835	0,0030
Furo 4	3,9843	0,0030
Furo ajustado	27,9984	0,0031

5. VALIDAÇÃO

Para certificar que os objetivos do projeto foram atingidos é de grande importância comprovar através de evidência experimental a utilidade das peças projetadas na análise de assuntos importantes de TC e que seus resultados e conclusões podem ser extrapolados para peças reais.

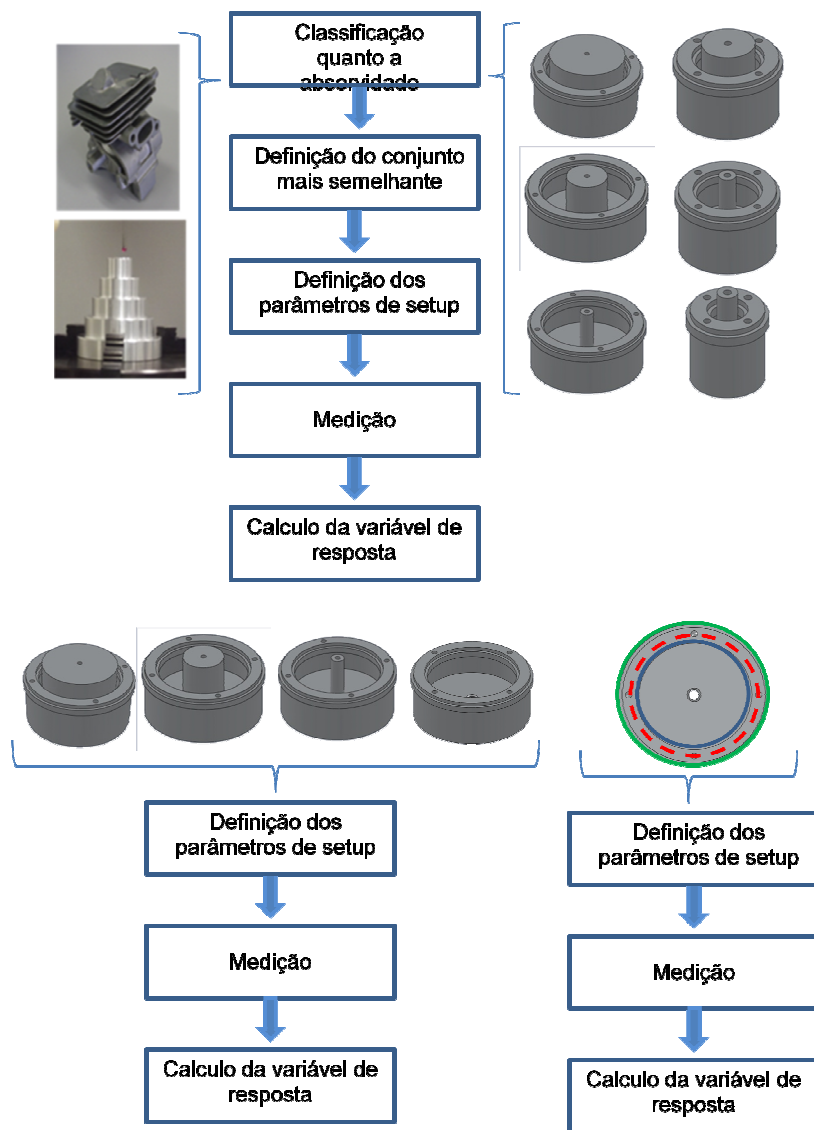
Para tal, foram elaborados três experimentos. No primeiro, o comportamento metrológico de uma das peças foi comparado com o de uma peça real e um padrão bastante estudado. Tal comparação objetiva analisar se há relação entre os resultados obtidos em três condições de medição diferente com as três peças. As conclusões avaliaram a capacidade dos novos padrões em emular medições reais e, por consequência, possibilitaram a extrapolação dos resultados para peças reais.

No segundo e terceiro experimentos foram investigados a aplicabilidade das peças na investigação de aspectos importantes da tecnologia como a profundidade de penetração e o processo de detecção de superfície.

O segundo experimento, que objetivava a investigação e quantificação da influência da profundidade de penetração, fez uso das quatro configurações possíveis com o Anel 90 fabricado em alumínio, como mostrado na Figura 38. Nessas configurações avaliou-se um indicador de tendência (desvio da medição) e um indicador de dispersão (S_{rms}) em uma circunferência medida sobre a pista interna em três condições de medição diferente. Como o mensurando é o mesmo e a única variação ocorre na profundidade de penetração, a diferença entre os valores do indicador de tendência e indicador de dispersão é um indicativo da influência da variação da profundidade de penetração.

De forma parecida, o processo de determinação de superfície foi investigado com a utilização do Anel 90 de Alumínio. Nessa peça mediu-se o indicador de tendência de circunferências medidas sobre a pista interna, externa e uma ajustada pelo centro dos quatro furos. Como a circunferência ajustada não depende do processo de determinação de superfície, a diferença entre os valores dos desvios das circunferências das pistas internas e externas em relação à circunferência ajustada é um bom indicativo do efeito do processo de determinação de superfície para essa tarefa de medição. Todos os três experimentos são esquematizados na Figura 38 juntamente com um fluxograma das atividades.

Figura 37 - Metodologia para validação



5.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do planejamento experimental levou em consideração o conhecimento prévio sobre as tecnologias envolvidas e os objetivos dos experimentos.

Ela também adotou princípios de projeto de experimentos, além de ter levado em consideração os princípios estatísticos da aleatoriedade e repetição, garantindo resultados e conclusões satisfatórios e estatisticamente válidos. [37]

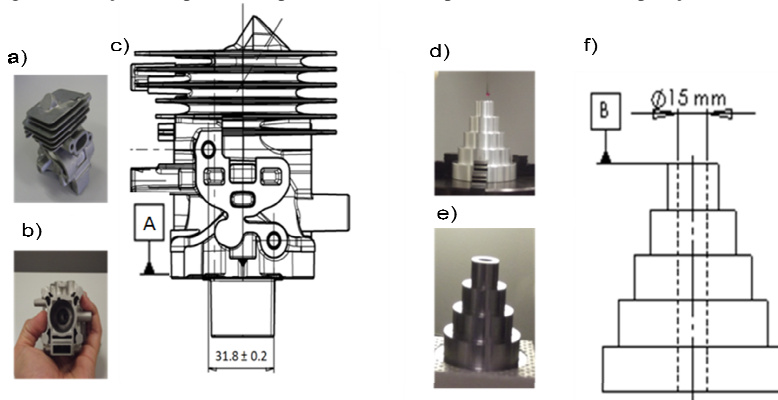
5.1.1. DEFINIÇÃO DAS PEÇAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS

O primeiro passo é a definição das peças experimentadas. Como as peças para os experimentos sobre a profundidade de penetração e detecção de superfícies já foram definidos, resta a definição da peça real, padrão e peça projetada mais adequada para a realização do experimento de intercomparação.

Tal definição ficou limitada pelo número de peças reais e padrões simples disponíveis. Dessa forma, as peças selecionadas foram apenas duas e são mostradas na Figura 38.

A peça da esquerda é um cilindro de motor dois tempos e a peça da direita é o padrão *Stepcylinder* descrito na sessão 2.5. Ambas são fabricadas em Alumínio e os mensurandos são circunferências medidas a 5,5 mm da referência A e B. Tais peças foram calibradas com estratégia de medição semelhante à utilizada na calibração dos padrões projetados.

Figura 38—Peça real e padrão simples utilizado no experimento de intercomparação



Já a definição do padrão projetado mais semelhante utilizou o critério da absorvidade que é função tanto do material quanto da profundidade de penetração.

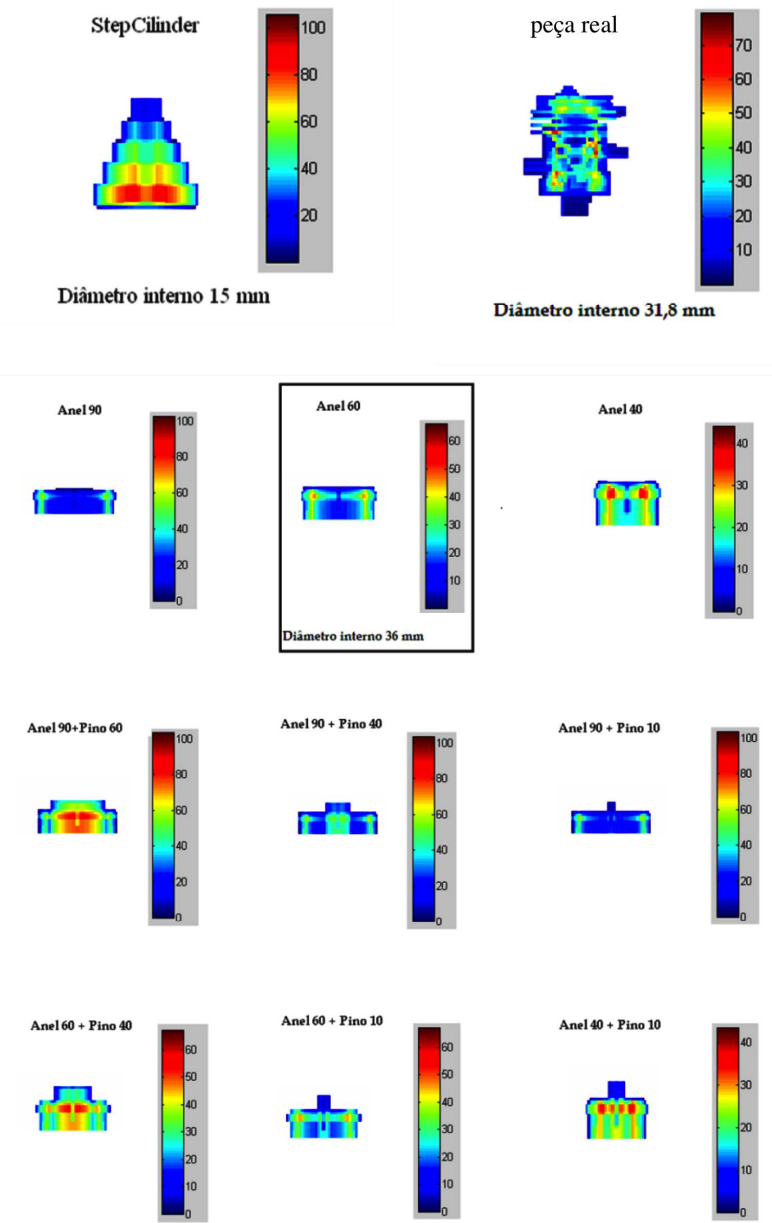
As peças reais e padrões selecionados, por serem de Alumínio, nos fizeram optar pelo conjunto de peças projetadas no mesmo material. Já a profundidade de penetração foi analisada com o auxílio do software *CTSCANNER* em desenvolvimento no laboratório de máquinas ferramenta da Universidade Politécnica de Aachen (WZL-Aachen)

Tal software utilizou as informações do modelo STL das peças reais, do padrão simples e das peças padrão projetadas para o cálculo da profundidade de penetração de acordo com a posição no volume de medição. Foram gerados, então, diversos gráficos de cores (mostrados na Figura 39) que serviram como base para a determinação da peça de maior semelhança.

Como a base de montagem rápida não foi projetada para receber peças reais e outros padrões, a análise ficou restrita a posições na qual o eixo principal das peças fosse perpendicular ao eixo de medição.

Na Figura 39 a peça padrão mais similar é indicada por um retângulo preto. Já a peça real e o padrão escolhido se encontram na parte superior da figura. Vale citar ainda que nem em todas as figuras as cores correspondem aos mesmos valores de profundidade de penetração.

Figura 39 - Análise da profundidade de penetração em milímetros na peça real, padrão simples e padrões projetados



5.1.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS E DAS VARIÁVEIS DE ANALISADAS

Tão importante quanto a definição do conjunto de peças mais semelhante foi a correta definição dos setups dos experimentos. Para isso, um passo importante foi a identificação da influência dos parâmetros sobre a variável de análise. Tais informações, levantadas por outro pesquisador do grupo de pesquisa, indicaram que os parâmetros de maior influência sobre a matriz de voxel são a espessura do pré-filtro, a tensão da fonte geradora e o número de projeções tomadas.

Somente com essas informações foi possível a definição de três condições de medição bastante diferente. Entretanto, todas as três condições buscaram maximizar o contraste e a resolução espacial da projeção. Tais conjuntos de parâmetros estão na Tabela 8 para o primeiro experimento, Tabela 9 para o experimento relativo à profundidade de penetração e o processo de detecção de superfície. Em todos os experimentos os setups definidos foram aplicados a todas as peças.

Tabela 8 - Parâmetros de configuração do experimento relativo à comparação entre peça projetada, peça real e padrão simples

Parâmetros de Configuração	Setup 01	Setup 02	Setup 03
Tensão da fonte, [keV]	225	225	225
Corrente da fonte, [μ A]	460	460	460
Tempo de integração, [ms]	1000	1500	2000
Ganho, [pF]	1,0	1,0	1,0
Espessura do pré-filtro, [mm]	0,25	0,50	1,00
Posição no eixo X, [mm]	390	390	390
Material	Al	Al	Al
Orientação da peça	0°	0°	0°
Número de projeções	1440	1440	1440
Filtro matemático	S.L	S.L	S.L
Binning	1	1	1

Tabela 9 - Parâmetros de configuração do experimento relativo à profundidade de penetração e processo de detecção de superfície

Parâmetros de Configuração	Setup 01	Setup 02	Setup 03
Tensão da fonte, [keV]	220	220	220
Corrente da fonte, [μ A]	450	450	450
Tempo de integração, [ms]	500	1500	2000

Ganho, [pF]	1,0	1,0	1,0
Espessura do pré-filtro, [mm]	0,00	0,50	1,00
Posição no eixo X, [mm]	400	400	400
Material	Al	Al	Al
Orientação da peça	0°	0°	0°
Número de projecções	1440	1440	1440
Filtro matemático	S.L	S.L	S.L
Binning	1	1	1

A estratégia experimental levou em consideração os princípios estáticos da aleatoriedade, repetição e controle local para garantir a validade dos resultados. Isso fez com que as medições ocorressem em ordem aleatória de peças e setup. As informações sobre essa ordem estão nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - ordem das medições dos experimentos sobre profundidade de penetração e detecção de superfície

Peças					Setup		
1º ciclo	Anel 90	Anel90Pino60	Anel90Pino10	Anel90Pino40	1	2	3
2º ciclo	Anel90Pino60	Anel90Pino10	Anel90Pino40	Anel 90	2	3	1
3º ciclo	Anel90Pino40	Anel90Pino60	Anel 90	Anel90Pino10	3	1	2
4º ciclo	Anel 90	Anel90Pino40	Anel90Pino60	Anel90Pino10	1	3	2
5º ciclo	Anel90Pino10	Anel 90	Anel90Pino60	Anel90Pino40	2	1	3

Tanto os dados resultantes da aquisição e pós-processamento da matriz de voxel quanto da medição da temperatura foram arquivados para posterior análise. Tal análise levou em consideração um indicador de tendência (indicador de tendência) e um indicador de dispersão (erro específico da tarefa de medição, conhecido como Srms) para todos os experimentos exceto o sobre detecção de superfície que utilizou apenas o indicador de tendência.

O indicador de dispersão foi usado porque leva em consideração não somente a imagem obtida por TC, mas também os processos de pós-processamento que também são um fator de influência sobre a qualidade do processo de medição. Ele também possibilita a utilização de ferramentas estatísticas como carta de controle e ANOVA, podendo ser quantificado através da equação 3. [14].

Equação 3

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [(m_i - \rho_{med}) - (r_i - \rho_{ref})]^2}$$

Na qual n corresponde ao número de pontos extraídos durante a apalpação virtual (etapa do pós-processamento em TC), ρ_{med} corresponde ao raio obtido por mínimos quadrados e m_i corresponde às coordenadas radiais, ambos obtidos pela medição com TC. Já ρ_{ref} corresponde ao raio obtido por mínimos quadrados e r_i corresponde às coordenadas radiais, ambos obtidos por MMC de referência. Para tal indicador quanto menor for o valor obtido, melhor é o processo de medição. [14]

5.2. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados entre os dias 16 de Agosto e primeiro de Setembro de 2011 em um Metrotom 1500[®] nas dependências do WZL-Aachen.

Em média foram realizadas nove medições por dia com a abertura da porta do tomógrafo apenas para a troca do pré-filtro e o posicionamento da próxima peça.

Todas as peças foram limpas com ar comprimido e flanelas embebidas em álcool e então posicionadas no ambiente de medição com antecedência de 12 horas para total estabilização térmica.

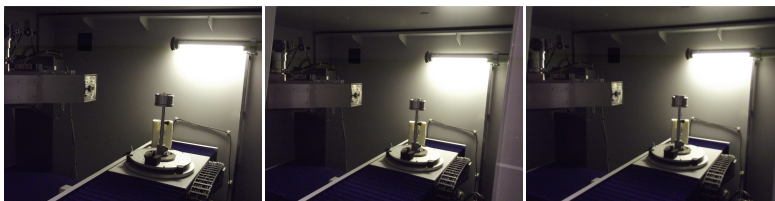
No momento da medição, a peça era posicionada sobre a base de montagem rápida e os parâmetros programados na interface de controle. Então o tomógrafo era ligado e a aquisição das projeções iniciadas.

Paralelamente era iniciada a medição de temperatura que utilizava um sensor PT-100 ligado a uma placa de aquisição de dados. O período de amostragem desse sistema era de 5 segundos.

Com o fim do processo de aquisição das projeções era encerrada a medição de temperatura e os arquivos gerados, tanto pelo tomógrafo quanto pelo sistema de medição de temperatura, eram arquivados. A Figura 40 mostra as peças no ambiente de medição.

Figura 40—Peça sendo medidas no tomógrafo





O pós-processamento foi realizado no software CALYPSO[®], da empresa Zeiss[®]. O intervalo de amostragem da apalpação virtual e o ajuste dos pontos foram os mesmos da calibração.

Já o processo de determinação da superfície utilizou o máximo gradiente de variação entre os tons de cinza em cada região da peça para o processo de *threshold*.

Por fim, as coordenadas dos pontos medidos por TC juntamente com as coordenadas dos pontos medidos durante a calibração foram então processadas para a obtenção dos indicadores de tendência e dispersão.

5.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os valores do indicador de tendência e do Indicador de dispersão em todos os experimentos são mostrados em forma de carta de controle. Como os valores foram calculados a partir da média das quatro repetições, a componente da variação associada à repetitividade está isolada dentro de cada subgrupo. Isso faz com que a única fonte de variabilidade esteja associada à variação dos parâmetros.

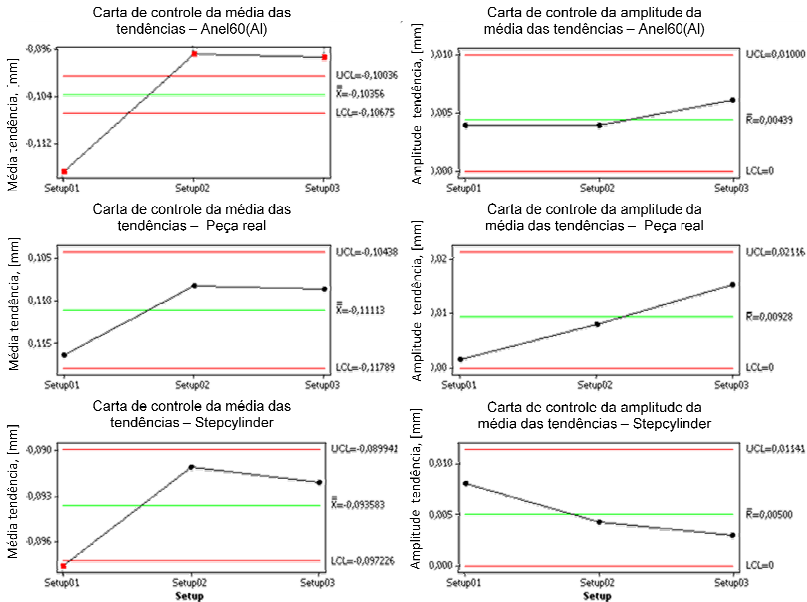
Tal aspecto associado ao fato de que quanto menor o indicador melhor é o processo de medição, levou a conclusão que para o experimento relativo à comparação do comportamento metrológico o setup 2 foi o de melhor qualidade em todas as peças. Os citados valores são mostrados na Figura 41 que exhibe as cartas de controle da média e da amplitude do desvio nas três peças analisadas.

Como descrito na sessão 2.3.2, isso possivelmente ocorreu porque o aumento da espessura do pré-filtro tornou o espectro energético mais monocromático, reduzindo a incidência de artefatos e a dispersão. Contudo, esse processo encontrou o seu ponto ótimo entre os valores de 0,5 e 1,0 mm, valores da espessura do pré-filtro do setup 2 e 3 respectivamente.

Já a magnitude dos valores foi um pouco maior na peça real o que era esperado devido aos aspectos específicos da tarefa de medição

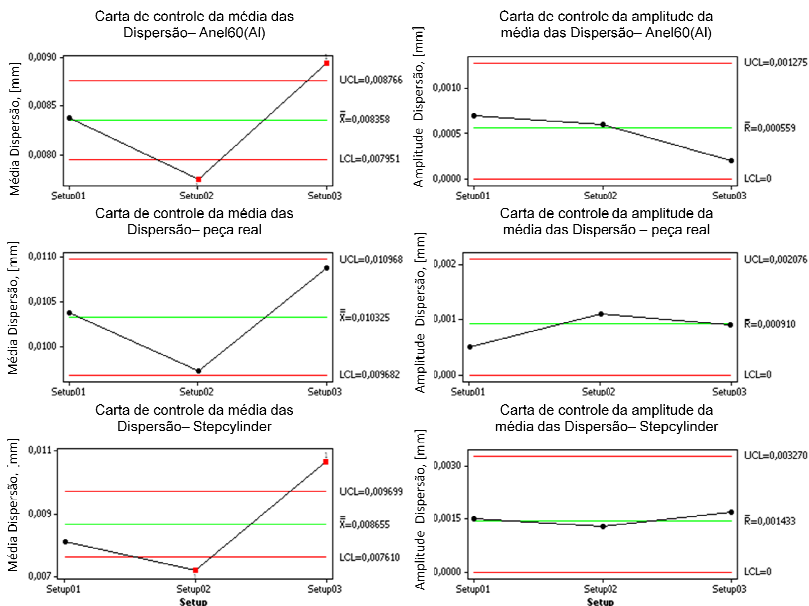
que não puderam ser emulados pelo conjunto de peças elaborado e nem pelo padrão simples.

Figura 41 - Cartas de controle para o indicador de tendência do experimento relativo a análise do comportamento metrológico. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.



Comportamento semelhante pode ser observado na análise do indicador de dispersão. Os resultados inclusive são mais significativos. Nela, o menor valor foi novamente encontrado no Setup 02 o que vem ao encontro dos resultados obtidos com a análise do desvio. Contudo, o maior valor foi encontrado no Setup 03. Isso pode estar correlacionado ao fato de que o indicador Srms leva em consideração outros aspectos que não são avaliados pelo indicador de tendência. Os valores encontrados para o Indicador de dispersão podem ser visualizados na Figura 42.

Figura 42 - cartas de controle para o erro específico da tarefa de medição do experimento relativo a análise do comportamento metrológico. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.

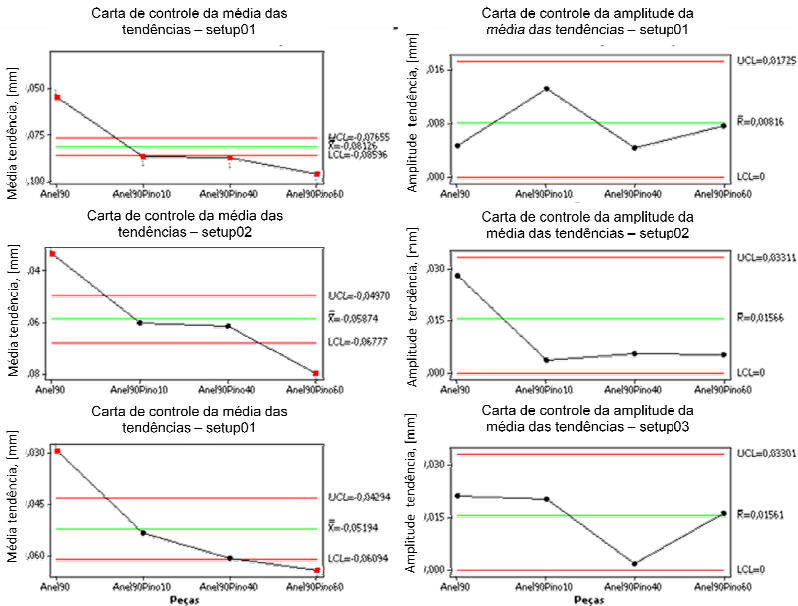


Já os resultados do segundo experimento mostraram que o aumento da profundidade de penetração acarreta um aumento no indicador de tendência. Isso fica claro quando analisamos a Figura 43 que mostra o menor indicador de tendênciapara a concepção com menor profundidade de penetração e o maior para a concepção de maior profundidade de penetração. Isso acontece nas três condições de medição o que confirma a correlação.

Há uma grande possibilidade que isso tenha ocorrido porque os parâmetros foram os mesmos para todas as configurações e a configuração com maior profundidade de penetração teve o menor contraste, tornando, por consequência,o processo de detecção de superfície menos preciso.

Além disso, como a única variação que ocorre para um mesmo setup é o aumento da profundidade de penetração, podemos afirmar que os valores mostrados são indicativos da influência da variação da profundidade de penetração na qualidade do processo de medição.

Figura 43 - cartas de controle para o indicador de tendência do experimento relativo a análise da profundidade de penetração. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.

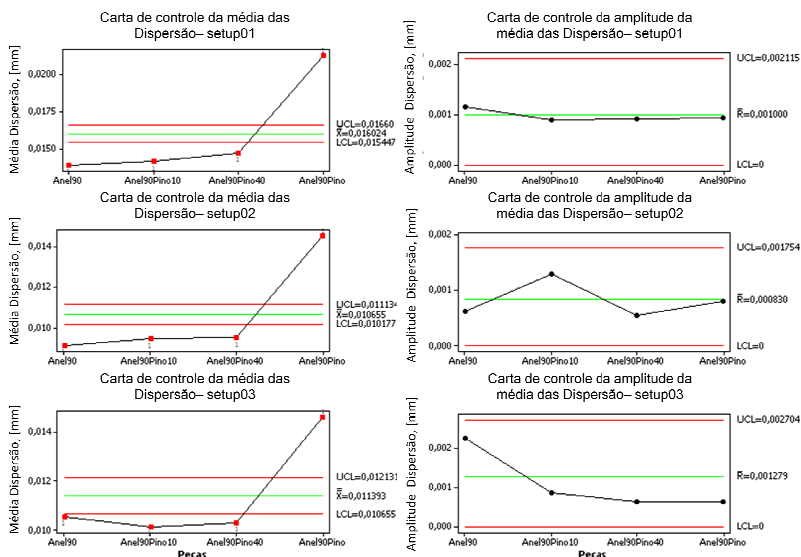


Outro importante resultado é que independente da configuração usada a menor tendência, ou seja, a melhor qualidade da medição foi obtida com o setup 03. Isso em parte é comprovado pela análise do erro específico da tarefa de medição,

Figura 44.

Tal indicador foi minimizado para todas as configurações no setup 03 exceto para o Anel 90 (A1) cujo resultado é um pouco maior. Contudo, como citado anteriormente, a razão desta incoerência pode estar no fato de que o Indicador de dispersão leva em consideração aspectos associados à etapa de pós-processamento, o que não ocorre com o indicador de tendência. Isso faz com que a comparação entre ambos os indicadores não seja tão trivial.

Figura 44 - Cartas de controle para o erro específico da tarefa de medição do experimento relativo a análise da profundidade de penetração. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.



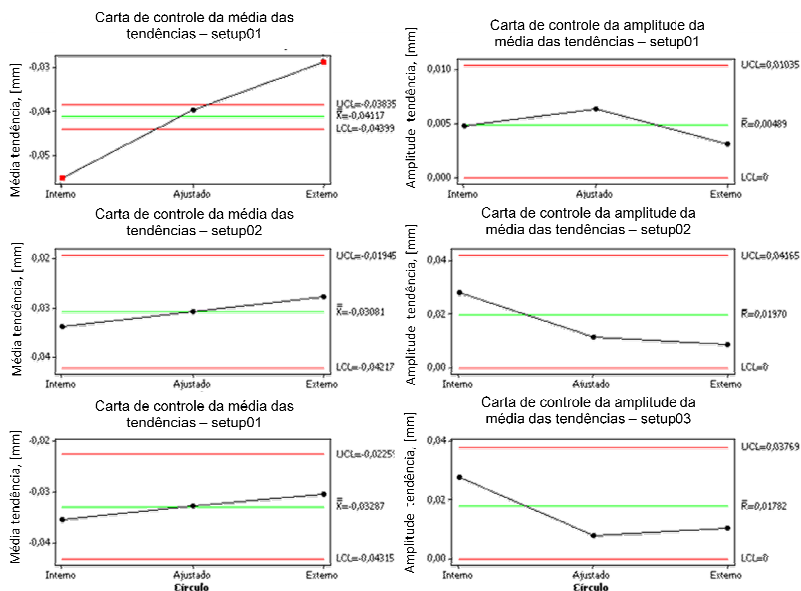
Por fim, o experimento relativo ao processo de detecção de superfície, apesar da presença de algum erro sistemático não compensado, mostrou resultado condizente ao esperado.

Conforme mostrado na Figura 45, a tendência na medição da circunferência medida sobre a pista interna assumiu maiores valores em todos os setups enquanto a tendência do círculo medido sobre a pista externa assumiu menores valores. Como visto na sessão 2.3.5, isso possivelmente ocorreu devido ao fato de que os valores medidos de diâmetros internos tendem a ser menores do que o valor verdadeiro. Já o efeito contrário ocorre na medição de diâmetros externos.

Já as magnitudes dos valores não foram como os esperados. O valor do indicador de tendência associado ao círculo ajustado deveria ser aproximadamente constante independentemente do setup, mas isso não ocorreu.

Adicionalmente, a fim de verificar alguma inconsistência durante a medição, foram elaborados gráficos de controle para a variação da amplitude de todos os indicadores em todos os experimentos. Estes gráficos são mostrados ao lado dos gráficos das médias e pode-se observar que não houve diferença significativa nos valores da variação das amplitudes, ou seja, os gráficos das médias são consistentes.

Figura 45 - Cartas de controle para o indicador de tendência do experimento relativo a análise do processo de detecção de superfície. A coluna da direita mostra as cartas de controle para a média e a coluna da esquerda mostra as cartas de controle para a amplitude da média.



Com todos esses resultados é possível afirmar que os objetivos do projeto foram alcançados. O comportamento metrológico das peças projetadas mostrou-se semelhante ao comportamento tanto da peça real quanto do padrão simples, permitindo que afirmemos que as peças projetadas emulam medições reais que os resultados e conclusões das investigações baseadas nelas podem ser extrapolados para medições reais.

Ficou clara também a capacidade de investigação das peças sobre assuntos importantes da tecnologia como o processo de detecção de superfície e a influência da profundidade de penetração.

Tais peças se mostraram capazes de quantificar e isolar o efeito da profundidade de medição sobre o resultado da medição além de quantificar o efeito do processo de detecção de superfície de maneira inovadora em se tratando de TC.

6. CONCLUSÃO

A necessidade do desenvolvimento de padrões que levasse em considerações aspectos específicos da tarefa de medição em TC foi suprida pelo conjunto de peças propostas.

O desenvolvimento sistemático do conceito gerou um conjunto de peças que traz vantagem em relação aos padrões já existentes. Isso foi comprovado pelos resultados que quantificaram e isolaram o efeito da profundidade de penetração e o processo de detecção da superfície sobre o resultado da medição de maneira inovadora.

Além disso, a base de montagem rápida mostrou-se muito eficiente e prática. A redução do tempo e repetitividade do posicionamento das peças no tomógrafo foram apreciáveis.

Da mesma forma a existência de superfícies fechadas possibilita uma abordagem harmônica gerando uma gama muito maior de conhecimento do que a abordagem cartesiana tradicional.

Tal ganho de conhecimento supre a necessidade do projeto CTmetro possibilitando, em trabalhos futuros, que os modelos qualitativos já existentes sejam quantificados com experimentos baseados nas peças projetadas.

Além disso, outra possibilidade para trabalhos futuros é a fabricação de uma segunda família de peças baseadas nos conceitos desenvolvidos nessa dissertação. Tal conjunto deve apresentar um espectro de emulação significativamente maior do que as peças já fabricadas.

Outra possibilidade é a investigação do perfil de temperatura dentro do volume de medição. Isso possibilitará a elaboração de um método de medição que permita a compensação desse efeito sistemático sobre o resultado da medição.

Da mesma forma a investigação da taxa de amostragem durante o processo de pós-processamento também se faz necessário. Tal parâmetro é de grande importância e as peças desenvolvidas podem ajudar na investigação desse parâmetro.

Vale também ser investigada a utilização de filtros matemáticos para reduzir a dispersão apresentada nas medições realizadas com as peças projetadas. Tal redução poderia gerar uma significativa melhora nos valores de repetitividade da medição.

Por fim a continuidade do projeto CTmetro é de grande importância. A definição da arquitetura do projeto e a definição da forma de construção de banco de dados devem ser cuidadosamente estudadas para garantir o cumprimento dos objetivos iniciais.

Por fim, a possibilidade de crescimento profissional e aquisição de conhecimento também foram únicas. A oportunidade de trabalhar com uma tecnologia complexa e em amadurecimento, possibilitou ao mestrando o aprimoramento da capacidade investigativa e sistemática.

A oportunidade de conviver em um grupo de pesquisa exigente e de estágio no exterior foram de grande importância no desenvolvimento profissional do mestrando. O intenso contato com a cultura alemã propiciou uma mudança de abordagem dos problemas de engenharia e até mesmo do cotidiano.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] I. Standard, “ISO 15708-1: Nondestructivetesting — Radiation methods — Computed tomography — Part 1:Principles,” 2002.
- [2] J. P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, and a. Weckenmann, “Computed tomography for dimensional metrology,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 821–842, Jan. 2011.
- [3] V. C. Nardelli, G. D. Donatelli, and C. A. Schneider, “Reproducibility of dimensional measurements performed by computed tomography,” pp. 6–9, 2010.
- [4] V. C. Nardelli, “Melhoria da incerteza e do tempo de medição na inspeção geométrica por tomografia computadorizada,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [5] F. CERTI, “Methods for fast setup and robust dimensional measurements with industrial X-ray computed tomography CTmetro,” 2008.
- [6] M. Bartscher, “Industrial computed tomography, an emerging coordinate measurement technology with high potentials” NCSL International workshop symposium, 2008 .
- [7] P. Krämer and A. Weckenmann, “Multi-energy image stack fusion in computed tomography,” *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 4, p. 045105, Apr. 2010.
- [8] C. Zeiss, “Metrotom 1500,” *Metrologia Industrial*, 2012. [Online]. Available:http://www.zeiss.com/__0625690b00021a2a.nsf/ContentsFrame/71a23f7e06561cea8625742e00567721?OpenDocument&Click=.
- [9] T. M. Buzug, *Computed Tomography:From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Springer, 2008 .

- [10] V. Andreu, B. Georgi, H. Lettenbauer, and J. A. Yagüe, “Analysis of the error sources of a Computer Tomography Machine.”
- [11] J. Kumar, A. Attridge, P. K. C. Wood, and M. a Williams, “Analysis of the effect of cone-beam geometry and test object configuration on the measurement accuracy of a computed tomography scanner used for dimensional measurement,” *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 3, p. 035105, Mar. 2011.
- [12] F. Welkenhuyzen, K. Kiekens, M. Pierlet, W. Dewulf, P. Bleys, and A. Voet, “Industrial Computer Tomography for Dimensional Metrology: Overview of Influence Factors and Improvement Strategies,” pp. 1–9.
- [13] K. Kiekens, F. Welkenhuyzen, Y. Tan, P. Bleys, A. Voet, W. Dewulf, and J. Kruth, “A test object for calibration and accuracy assessment in x-ray CT metrology,” pp. 5–8, 2010.
- [14] V. C. Nardelli, F. A. Arenhart, G. D. Donatelli, C. Maurício, C. Niggemann, and R. Schmitt, “Feature-based analysis for quality assessment of x-ray computed tomography measurements,” no. March, 2012.
- [15] R. Schmitt and C. Niggemann, “Uncertainty in measurement for x-ray-computed tomography using calibrated work pieces,” *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 5, p. 054008, May 2010.
- [16] M. Bartscher, M. Neukamm, U. Hilpert, U. Neuschaefer-rube, F. Härtig, K. Kniel, K. Ehrig, A. Staude, and J. Goebbels, “Achieving traceability of industrial computed tomography,” pp. 256–261, 1837.
- [17] M. Bartscher, U. Hilpert, J. Goebbels, and G. Weidemann, “Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 495–498, Jan. 2007.

- [18] H. Lettenbauer, B. Georgi, and D. Weiß, “Means to Verify the Accuracy of CT Systems for Metrology Applications (In the Absence of Established International Standards),” 2007.
- [19] International Organization for Standardization, “ISO 15708-2: Nondestructivetesting — Radiation methods — Computed tomography — Part 2:Principles” 2002.
- [20] U. Neuschaefer-rube, M. Bartscher, M. Neukamm, F. Härtig, and P. T. B. P. Bundesanstalt, “Dimensional Measurements with Micro-CT -Test Procedures and Applications,” no. October. pp. 1–28, 2009.
- [21] S. Carmignato, D. Dreossi, L. Mancini, F. Marinello, G. Tromba, and E. Savio, “Testing of x-ray microtomography systems using a traceable geometrical standard,” *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 8, p. 084021, Aug. 2009.
- [22] D. S. Hamburg-piekar, “Calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas.”Universidade Federal de Santa Catarina,2006.
- [23] M. Bartscher, M. Koch, and U. Neuschaefer-rube, “A new test piece for geometry and defect measurements with micro-CT,” no. 5.
- [24] CAPES, “Bragecrim,” 2012. [Online]. Available: <http://www.capes.gov.br/cooperacao-internacional/alemanha/bragecrim>.
- [25] WZL(RWTH), “We’ll pool experience and work together,” 2012. [Online]. Available: <http://www.bragecrim.rwth-aachen.de/>.
- [26] Certi and WZL, “Methods for fast setup and robust dimensional measurements with industrial X-ray computed tomography.” .
- [27] G. Paul, W. Beitz, J. Feldhulsen, and K. H. Grote, *Projeto na engenharia, fundamentos do desenvolvimento eficaz de produto*. Springer, 2005.

- [28] A. Ogliari, “A sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados,” Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [29] C. A. Dufour, “Estudo do processo e das ferramentas de reprojeção de produtos industriais, como vantagem competitiva e estratégica de melhoria constante,” Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- [30] A. J. H. Fonseca, “Metodologia para a elaboração das especificações de projetos de produtos industriais,” Tese - Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [31] J. Siqueira, “Ferramentas de criatividade, brainstorming,” pp. 4–5.
- [32] H. Abdi and L. J. Williams, “Pairwise Comparisons.” pp. 1–11, 2010.
- [33] L. Santos, M. Oliveira, T. Cristina, V. Domingues, and C. Uff, “Exemplo comparativo de métodos subjetivos e objetivos em multicritério,” 2007.
- [34] F. R. Marinho and FIESP, “Acoplamento,” 2005.
- [35] A. S. (Department of M. Engineering/M.I.T), “KINEMATIC COUPLINGS WEBSITE.” [Online]. Available: <http://pergatory.mit.edu/kinematiccouplings/index.htm>.
- [36] M. L. Culpepper, B. S. M. Engineering, A. H. Slocum, T. Supervisor, and A. A. Sonin, “Design and Application of Compliant Quasi-Kinematic Couplings by,” 2000.
- [37] D. Montgomery, G. Hunger, and Norma Hubele, *Estatística e probabilidade para engenheiros*. Ltc, 2012.

Figura 48 - desenho técnico do Anel 60 (Al)

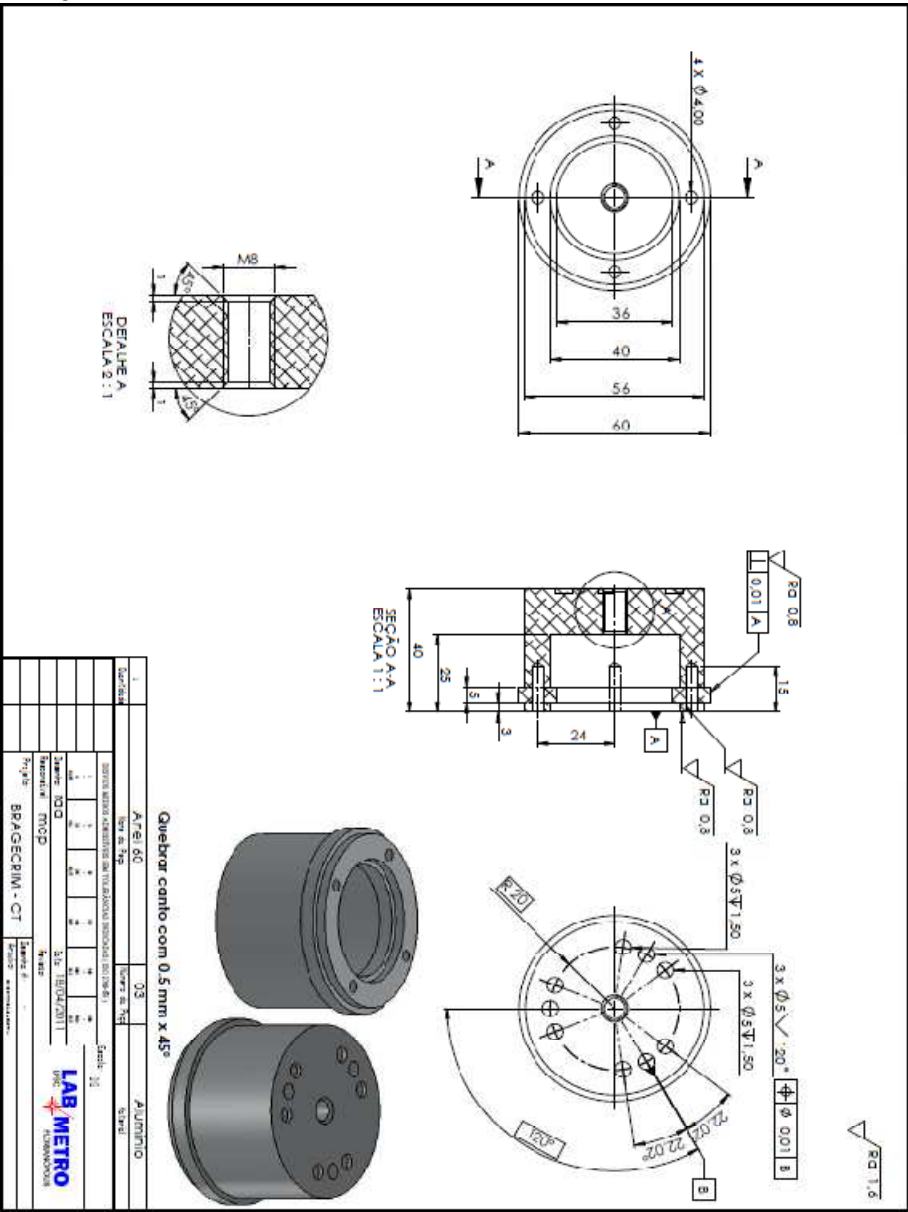
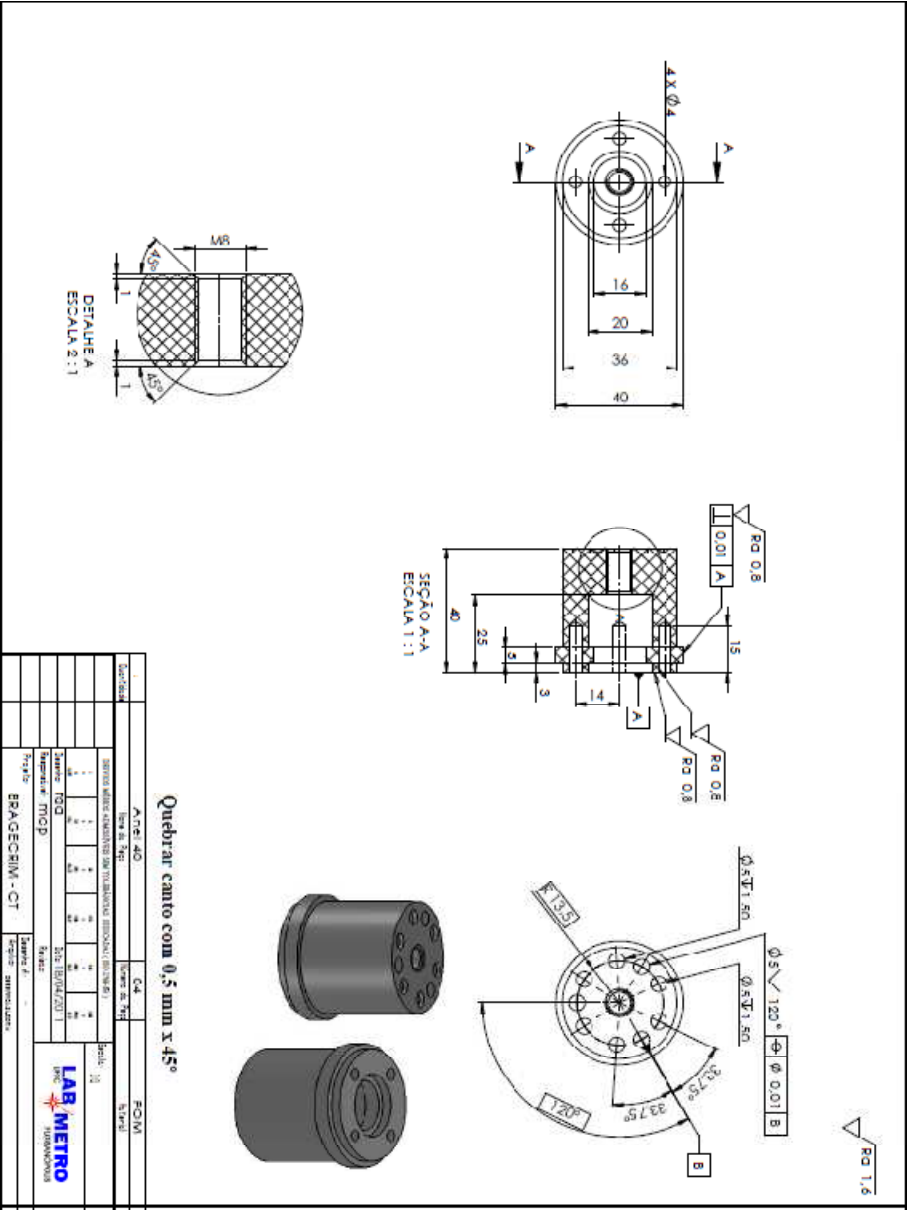


Figura 51 - desenho técnico do Anel 40 (POM)



APÊNDICE 3

Mensurando: Todos os mensurandos são diâmetros e podem ser considerados mensurandos invariáveis porque o método de ajuste utilizado, mínimos quadrados, considera todos os pontos medidos para a definição dos resultados.

Função de medição: Os mensurandos podem ser representados pela equação:

$$RM = (RB \pm (IM)) \text{ mm}$$

Sendo

- RM: resultado da medição,
- RB: resultado base (média aritmética de todos os resultados obtidos por mínimos quadrados)
- IM: Incerteza da medição (calculada de acordo com o procedimento descrito no Guia para expressão da Incerteza de Medição)

Procedimento de medição:

Etapas	Descrição
1	Limpeza da peça com ar comprimido e flanela embebida em álcool Isopropílico
2	Verificação da temperatura da sala de medição
3	Estabilização térmica com a colocação da peça na sala de medição com 4 horas de antecedência
4	Definição do tipo e diâmetro da esfera para a qualificação do apalpador
5	Qualificação do apalpador
6	Localização da peça no volume de medição a partir de quatro pontos tomados no plano de topo, na pista interna e no furo de referência(Ver figura 1)
7	Definição do sistema de coordenadas a partir de um plano ajustado por mínimos quadrados a partir de oito pontos tomados no plano de topo, de um cilindro a partir de quatro pontos tomados na pista interna e de outro, a partir de 4 pontos tomados no furo de referência. As medições na pista interna e no furo de referência serão realizadas a 5,5 mm do plano de topo (ver Figura 36)
8	Medição dos furos menores com intervalo de amostragem de

	acordo com a Tabela 6e posterior ajuste por mínimos quadrados.
9	Medição da pista interna com intervalo de amostragem de acordo com a tabela 1 e posterior ajuste por mínimos quadrados.
10	Medição da pista externa com frequência de aquisição de acordo com a tabela 1 e posterior ajuste por mínimos quadrados.
11	Arquivar o relatório de medição juntamente com os arquivos gerados.
12	Repetir as tarefas 6 a 11 por mais 2 vezes, totalizando três repetições.
13	Verificar a temperatura do ambiente de medição.
14	Adotar a média dos resultados das repetições como indicativo do resultado base.
15	Avaliação das incertezas a partir do método descrito no ISO GUM
17	Exprimir o resultado de acordo com o VIM.

*todas as condições usadas durante a validação do sensor devem ser mantidas durante a medição

Balanço de incerteza:

- Anel 90 (A1):

Tabela 12- balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 90 (A1)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9837		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos		Efeitos aleatórios		
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
CC	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9837		±	0,0030 mm	
				Erro de form.	0,0042	mm

Tabela 13 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 90 (A1)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9855		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos		Efeitos aleatórios		
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	4,04E-04	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001563	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003127	
Resultado base		3,9855		±	0,0031	mm
				Erro de form.	0,0061	mm

Tabela 14 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 90 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9843		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9843		±	0,0030 mm	

Erro de form: 0,0039 mm

Tabela 15 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 90 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9840		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
lcomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9840		±	0,0030 mm	

Erro de form: 0,0035 mm

Tabela 18 - balanço de incerteza pista externa Anel 90 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		90,2367		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,73E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	1,00E-04	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001729	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003457	
Resultado base		90,2367		±	0,0035 mm	

Erro de form: 0,0142 mm

- Anel 90 (POM)

Tabela 19 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 90 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9585		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		os sistema	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9585	±	0,0030	mm	

Erro de form: 0,0311 mm

Tabela 22 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 90 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9592		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		os sistemaEfeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9592	±	0,0030	mm	
		Erro de form: 0.0269 mm				

Tabela 23 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 90 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		77,9139		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		os sistemaEfeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,69E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	4,73E-04	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,00176	inf
U	Incerteza expandida			Normal	inf	
Resultado base		77,9139	±	0,0035	mm	
				Erro de form:	0.0325	mm

●Anel 60 (Al)

Tabela 26 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 60 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9838		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9838		±	0,0030 mm	

Erro de form: 0,0020 mm

Tabela 27 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 60 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9831		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9831		±	0,0030 mm	

Erro de form: 0,0033 mm

Tabela 28 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 60 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9836		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9836		±	0,0030 mm	

Erro de form: 0,0092 mm

Tabela 29 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 60 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9852		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9852		±	0,0030	mm

Erro de form: 0,0070 mm

Tabela 30 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 60 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		47,9898		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,62E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001621	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003243	
Resultado base		47,9898		\pm	0,0032	mm

Erro de form: 0,0108 mm

Tabela 31 - balanço de incerteza pista interna Anel 60 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		35,8542		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,59E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001591	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003182	
Resultado base		35,8542	\pm	0,0032	mm	

Erro de form: 0.0041 mm

Tabela 34 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 60 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9610			Unidade	mm
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	1,00E-04	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001513	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003027	
Resultado base		3,9610	±	0,0030	mm	

Erro de form: 0,0208 mm

Tabela 35 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 60 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9590			Unidade	mm
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9590	±	0,0030	mm	

Erro de form: 0,0262 mm

Tabela 36 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 60 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9581		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9581		±	0,0030	mm

Erro de form: 0,0192 mm

Tabela 37 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 60 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		48,0027		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,62E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,69E-04	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001717	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003434	
Resultado base		48,0027		±	0,0034	mm

Erro de form: 0,0046 mm

Tabela 38 - balanço de incerteza pista interna Anel 60 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		36,1022		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,59E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	3,79E-04	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001635	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,00327	
Resultado base		36,1022	±	0,0033	mm	

Erro de form: 0,0305 mm

Tabela 39 - balanço de incerteza pista externa Anel 60 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		60,2158		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,65E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	4,73E-04	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001717	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003434	
Resultado base		60,2158		±	0,0034 mm	

Erro de form: 0,0947 mm

•Anel 40 (Al)

Tabela 40 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 40 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9868		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos		Efeitos aleatórios		
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9868		±	0,0030	mm
				Erro de form.	0,0034	mm

Tabela 41 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 40 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9838		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos		Efeitos aleatórios		
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9838		±	0,0030	mm
				Erro de form.	0,0056	mm

Tabela 42 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 40 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9835		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
CC	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9835		\pm	0,0030 mm	

Erro de forma:	0,0029	mm
----------------	--------	----

Tabela 43- balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 40 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9843		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>Icomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001511	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003023	
Resultado base		3,9843		\pm	0,0030	mm

Erro de forma:	0,0051	mm
----------------	--------	----

Tabela 46 - balanço de incerteza pista externa Anel 40 (Al)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		40,4595		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,60E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001602	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003205	
Resultado base		40,4595		±	0,0032	mm
				Erro de form:	0,0050	mm

•Anel 40 (POM)

Tabela 47 - balanço de incerteza furo pequeno 1 Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9730		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
CC	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511312	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003022623	
Resultado base		3,9730		±	0,0030	mm
				Erro de forma	0,0249	mm

Tabela 48 - balanço de incerteza furo pequeno 2 Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9802			Unidade	mm
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,00151133	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003022659	
Resultado base		3,9802		±	0,0030	mm
				Erro de forma	0,0145	mm

Tabela 49 - balanço de incerteza furo pequeno 3 Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9656			Unidade	mm
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,001511293	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,003022586	
Resultado base		3,9656		±	0,0030	mm
				Erro de forma	0,0293	mm

Tabela 50 - balanço de incerteza furo pequeno 4 Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		3,9817			Unidade	mm
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,51E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,77E-05	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001511333	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003022667	
Resultado base		3,9817		±	0,0030	mm
				Erro de forma	0,0186	mm

Tabela 51 - balanço de incerteza círculo ajustado Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		28,0193		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,57E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	5,51E-04	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001664097	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003328193	
Resultado base		28,0193	±	0,0033	mm	
				Erro de forma	0,0005	mm

Tabela 52 - balanço de incerteza pista interna Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		15,9894			Unidade	mm
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
<i>lcomb</i>	Erro combinado	-		Normal	1,54E-03	inf
<i>Erep</i>	Repetitividade	-		Normal	1,53E-04	2
<i>Eres</i>	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
<i>Cc</i>	Correção combinada	-				
<i>Uc</i>	Incerteza combinada			Normal	0,0015478	inf
<i>U</i>	Incerteza expandida			Normal	0,0030956	
Resultado base		15,9894		±	0,0031	mm
				Erro de forma	0,0055	mm

Tabela 53 - balanço de incerteza pista externa Anel 40 (POM)

Medição com MMC tátil						
Resultado Base		40,1191		Unidade	mm	
Número de medições		3 ciclos				
Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	α	Distribuição	u	v
Icomb	Erro combinado	-		Normal	1,60E-03	inf
Erep	Repetitividade	-		Normal	6,56E-04	2
Eres	Resolução	-	0,00005	Retangular	2,89E-05	inf
Cc	Correção combinada	-				
Uc	Incerteza combinada			Normal	0,001729678	inf
U	Incerteza expandida			Normal	0,003459356	
Resultado base		40,1191	±	0,0035	mm	
			Erro de forma		0,0080	mm

Resultado da calibração:

Tabela 54 - compilação dos resultados da calibração

Calibração		
	Resultado base, [mm]	Incerteza da medição, [mm]
Anel 90 (POM)		
Pista interna	65,7974	0,0034
Pista externa	90,4028	0,0035
Furo 1	3,9585	0,0030
Furo 2	3,9678	0,0030

Furo 3	3,9620	0,0030
Furo 4	3,9592	0,0030
Furo ajustado	77,9139	0,0035
Anel 60 (POM)		
Pista interna	36,1022	0,0033
Pista externa	60,2158	0,0034
Furo 1	3,9670	0,0030
Furo 2	3,9610	0,0030
Furo 3	3,9590	0,0030
Furo 4	3,9581	0,0030
Furo ajustado	48,0027	0,0034
Anel 40 (POM)		
Pista interna	15,9894	0,0031
Pista externa	40,1191	0,0035
Furo 1	3,9730	0,0030
Furo 2	3,9802	0,0030
Furo 3	3,9656	0,0030
Furo 4	3,9817	0,0030
Furo ajustado	28,0193	0,0033
Anel 90 (Al)		
Pista interna	65,9012	0,0034
Pista externa	90,2367	0,0035
Furo 1	3,9837	0,0030
Furo 2	3,9855	0,0031
Furo 3	3,9843	0,0030
Furo 4	3,9840	0,0030
Furo ajustado	77,9947	0,0034
Anel 60 (Al)		
Pista interna	35,8542	0,0032
Pista externa	60,2622	0,0033
Furo 1	3,9838	0,0030
Furo 2	3,9831	0,0030
Furo 3	3,9836	0,0030
Furo 4	3,9852	0,0030
Furo ajustado	47,9898	0,0032
Anel 40 (Al)		
Pista interna	16,2782	0,0031
Pista externa	40,4595	0,0032
Furo 1	3,9868	0,0030
Furo 2	3,9838	0,0030
Furo 3	3,9835	0,0030
Furo 4	3,9843	0,0030
Furo ajustado	27,9984	0,0031